



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

SPALOVÁNÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ S PŘÍDAVKEM ALKALIÍ

INCINERATION OF SLUDGE MIXED WITH ALKALI

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VÁCLAV URBAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LUCIE HOUDKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Václav Urban

který/která studuje v magisterském navazujícím studijním programu

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Spalování čistírenských kalů s přídavkem alkálií

v anglickém jazyce:

Incineration of Sludge Mixed with Alkali

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Spalování čistírenských kalů je provázáno emisemi škodlivin v plynné i pevné fázi. Ve spalinách se jedná zejména o SO₂ a HCl, další problematickou složkou kalů jsou těžké kovy. Množství produkovaných kyselých složek ve spalinách, resp. distribuci těžkých kovů je možné ovlivnit přídavkem vápenatých sloučenin ke kalu ještě před jeho vlastním spalováním.

Cíle diplomové práce:

Student se seznámí s principem spalování odpadů a čištění spalin. Student se bude účastnit spalovacích zkoušek kalu s přídavkem vápence. Student vyhodnotí experimenty a vyvodí z nich závěry.

Seznam odborné literatury:

Obroučka, K. Termické odstraňování a energetické využívání odpadů. VŠB-TU Ostrava, 2001. ISBN 80-248-0009-8.

Dlouhý, T. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. ČVUT Praha, 2007. ISBN 978-80-01-03757-7.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Lucie Houdková, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 15.11.2010

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Urban Václav: Spalování čistírenských kalů s přidavkem alkálií

Diplomová práce je zaměřena na problematiku spalování čistírenských kalů a vlivu vápence na tvorbu emisí. V práci jsou popsány způsoby spalování čistírenských kalů a možnosti čištění spalin.

Součástí práce je návrh a popis experimentu spalování čistírenských kalů s přidavkem vápence ve fluidním reaktoru.

Závěrečná část práce se zabývá vyhodnocením emisí z experimentu spalování. Vyhodnocované složky spalin jsou: těžké kovy, TZL, SO₂, CO, CO₂, HCl, HF, O₂, NO, PAU, PCB, PCDD/F.

Klíčová slova: čistírenský kal, fluidní kotel, spalování, emise, termická dezintegrace

ABSTRACT

Urban Václav: Incineration of sludge with alkali

Subject of the present Ing. thesis is problem of incineration of sewage sludge and influence of lime on production of emissions. In work are described kinds of sewage sludge combustion and possibilities of emission cleaning.

Work includes design and description of experimental combustion of sewage sludge mixed with calcite in fluidized bed reactor.

The end of work deals with, evaluation of emissions from combustion experiment. Evaluated components of burnt gases are: heavy metals, TZL, SO₂, CO, CO₂, HCl, HF, O₂, NO, PAH, PCB, PCDD/F.

Key words: sewage sludge, fluidized bed reactor, incineration, emission, thermal deintegration

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

URBAN, V. *Spalování čistírenských kalů s přidavkem alkálií*. Brno, 2011. 66 s. Diplomová práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí diplomové práce Ing. Lucie Houdková Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 27.5.2011

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu závěrečné práce Ing. Lucii Houdkové, Ph.D. a Dipl.-Ing. Thomasu Elsässerovi za cenné informace a rady týkající se zpracování diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT.....	- 4 -
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE.....	- 4 -
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ.....	- 5 -
PODĚKOVÁNÍ	- 6 -
OBSAH	- 7 -
Seznam symbolů	- 8 -
1. Úvod.....	- 10 -
1.1 Nakládání s čistírenskými kaly v ČR	- 10 -
2. Termické zpracování kalů.....	- 13 -
2.1 Výhody termického zpracování	- 13 -
2.2 Průmyslová zařízení pro spalování čistírenského kalu	- 15 -
2.3 Přehled základních zařízení používaných pro spalování čistírenských kalů.....	- 15 -
2.3.1 Pec s fluidním ložem	- 17 -
2.3.2 Etážová pec	- 18 -
2.3.3 Etážová pec s fluidním ložem.....	- 18 -
3. Čištění spalin.....	- 20 -
3.1 Emisní předpisy pro spalování čistírenských kalů vycházející z legislativy	- 20 -
3.2 Způsoby čištění spalin a jejich kombinace	- 23 -
3.3 Suchá vápencová metoda	- 24 -
4. Experimentální část.....	- 26 -
4.1 Experimentální zařízení	- 26 -
4.1.1 Dávkování paliva	- 28 -
4.1.2 Transport paliva	- 30 -
4.1.3 Měřicí a odběrové zařízení	- 31 -
4.1.4 Charakteristika paliva	- 32 -
4.2 Návrh experimentu	- 35 -
4.2.1 Stechiometrický výpočet spalování čistírenského kalu pro podmínky experimentu	- 35 -
4.2.2 Výpočet prahových rychlostí fluidizace	- 39 -
4.2.3 Ověření navržených experimentálních podmínek spalování	- 40 -
4.2.4 Ověření navržených experimentálních podmínek fluidizace.....	- 41 -
4.3 Postup experimentů.....	- 45 -
4.3.1 Příprava složek fluidní vrstvy pro experiment.....	- 46 -
4.4 Výsledky experimentu	- 48 -
4.4.1 Vyhodnocení obsahu SO ₂ ve spalinách	- 48 -
4.4.2 Vyhodnocení obsahu těžkých kovů ve spalinách	- 49 -
4.4.3 Vyhodnocení obsahu fluoru ve spalinách	- 50 -
4.4.4 Vyhodnocení obsahu chloru ve spalinách	- 51 -
4.4.5 Vyhodnocení obsahu TZL ve spalinách	- 52 -
4.4.6 Vyhodnocení obsahu PCDD/F ve spalinách.....	- 53 -
4.4.6 Vyhodnocení obsahu PAU ve spalinách.....	- 54 -
4.4.6 Vyhodnocení obsahu PCB ve spalinách	- 55 -
4.4.7 Vyhodnocení obsahu CO ve spalinách	- 56 -
4.4.8 Vyhodnocení obsahu NO ve spalinách	- 57 -
4.4.9 Vyhodnocení obsahu CO ₂ ve spalinách.....	- 58 -
4.4.10 Vyhodnocení obsahu O ₂ ve spalinách.....	- 59 -
5. Závěr	- 60 -
Seznam použité literatury.....	- 63 -
Seznam příloh	- 65 -

Seznam symbolů

A	Koeficient kvadratické rovnice	[-]
B	Koeficient kvadratické rovnice	[-]
C	Koeficient kvadratické rovnice	[-]
E_M	Naměřená koncentrace	$[\text{mg}/\text{m}_N^3]$
E_S	Přepočtená hodnota emisní koncentrace na referenční obsah kyslíku	$[\text{mg}/\text{m}_N^3]$
MW_C	Molární hmotnost uhlíku	$[\text{kg}/\text{kmol}]$
MW_{H_2}	Molární hmotnost vodíku	$[\text{kg}/\text{kmol}]$
MW_{H_2O}	Molární hmotnost vody	$[\text{kg}/\text{kmol}]$
MW_{N_2}	Molární hmotnost dusíku	$[\text{kg}/\text{kmol}]$
MW_{O_2}	Molární hmotnost kyslíku	$[\text{kg}/\text{kmol}]$
MW_S	Molární hmotnost síry	$[\text{kg}/\text{kmol}]$
MW_{vz}	Molární hmotnost vzduchu	$[\text{kg}/\text{kmol}]$
\dot{N}	Objemový tok transportního dusíku	$[\text{m}_N^3/\text{h}]$
O_{stech}	Stechiometrická spotřeba kyslíku	$[\text{kmol}_{O_2}/\text{kg}_{\text{paliva}}]$
O_M	Naměřený obsah kyslíku	[%]
O_S	Referenční obsah kyslíku	[%]
R	Univerzální plynová konstanta	$[\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}]$
T	Teplota	[K]
\dot{V}	Objemový tok dávkovaného vzduchu	$[\text{m}_N^3/\text{h}]$
V_m	Molární objem	$[\text{m}_N^3/\text{kmol}]$
\dot{V}_{stech}	Průtok vzduchu pro $\lambda=1$	$[\text{m}_N^3/\text{h}]$
VZ_{stech}	Stechiometrická spotřeba vzduchu	$[\text{kmol}_{vzd}/\text{kg}_{\text{paliva}}]$
c	Hmotnostní koncentrace uhlíku v palivu	[-]
d_p	Ekvivalentní průměr částice	[m]
h	Hmotnostní koncentrace vodíku v palivu	[-]
h_{FV}	Výška fluidní vrstvy	[m]
\dot{m}	Hmotnostní tok dávkovaného paliva	$[\text{kg}/\text{h}]$
n	Hmotnostní koncentrace dusíku v palivu	[-]
n_{celk}	Celková stechiometrická tvorba spalin	$[\text{kmol}/\text{kg}_{\text{paliva}}]$
$n_{\text{celk},\text{such}}$	Celková stechiometrická tvorba suchých spalin	$[\text{kmol}/\text{kg}_{\text{paliva}}]$
n_{co}	Stechiometrická tvorba oxidu uhelnatého	$[\text{kmol}/\text{kg}_{\text{paliva}}]$
n_{CO_2}	Stechiometrická tvorba oxidu uhličitého	$[\text{kmol}/\text{kg}_{\text{paliva}}]$
$n_{\text{H}_2\text{O}}$	Stechiometrická tvorba vody z reakce vodíku v palivu	$[\text{kmol}/\text{kg}_{\text{paliva}}]$
$n_{\text{H}_2\text{O},\text{celk}}$	Celková stechiometrická tvorba vody	$[\text{kmol}/\text{kg}_{\text{paliva}}]$
$n_{\text{H}_2\text{O},\text{pal}}$	Stechiometrická tvorba vody z vody obsažené v palivu	$[\text{kmol}/\text{kg}_{\text{paliva}}]$
$n_{\text{H}_2\text{O},\text{VZ}}$	Stechiometrická tvorba vody z vody ve vzduchu	$[\text{kmol}/\text{kg}_{\text{paliva}}]$
n_{N_2}	Stechiometrická tvorba dusíku	$[\text{kmol}/\text{kg}_{\text{paliva}}]$
$n_{\text{N}_2,\text{celk}}$	Celková stechiometrická tvorba dusíku	$[\text{kmol}/\text{kg}_{\text{paliva}}]$
$n_{\text{N}_2,\text{tr}}$	Stechiometrická tvorba dusíku přicházejícího z transportního dusíku	$[\text{kmol}/\text{kg}_{\text{paliva}}]$

$n_{N_2, VZ}$	Stechiometrická tvorba dusíku ze spalovaného vzduchu vztažená na palivo	[kmol/kg _{paliva}]
n_{O_2}	Stechiometrická tvorba kyslíku	[kmol/kg _{paliva}]
n_{SO_2}	Stechiometrická tvorba oxidu siřičitého	[kmol/kg _{paliva}]
o	Hmotnostní koncentrace kyslíku v palivu	[-]
p	Tlak za atmosferických podmínek	[Pa]
Δp	Tlaková ztráta vrstvy	[Pa]
$\Delta p_{ppř}$	Tlaková ztráta porézní přepážky	[Pa]
s	Hmotnostní koncentrace síry v palivu	[-]
u_{mf}	Prahová rychlost fluidizace	[m/s]
u_u	Mezní rychlost úletu	[m/s]
w	Hmotnostní koncentrace vody v palivu	[-]
x_{H_2O}	Objemová koncentrace vody ve vlhkém vzduchu	[-]
x_{N_2}	Objemová koncentrace dusíku ve vlhkém vzduchu	[-]
x_{O_2}	Objemová koncentrace kyslíku ve vlhkém vzduchu	[-]
y_i	Koncentrace složek v suchých spalínách	[-]
α	Součinitel tvorby CO	[-]
β	Součinitel uhlíku neúčastnícího se spalování	[-]
η	Dynamická viskozita	[Pa.s]
λ	Součinitel přebytku vzduchu	[-]
ρ_k	Hustota proudícího media	[kg/m ³]
ρ_t	Hustota tuhé látky	[kg/m ³]

1. Úvod

Nakládání s odpady bylo vždy jedno z témat, kterým se lidstvo zabývá už odedávna. Už v pravěku či středověku se lidé snažili odpad, který vytvářejí dále užítkovat v různých sférách svého následujícího působení. S přírůstkem počtu populace a rozvojem industrializace zákonitě dochází k daleko větší produkci odpadních látek a záboru doposud neznečištěných míst planety. Otázka nakládání s odpady začala být zvláště aktuální v minulém tedy ve 20. století a ve své podstatě je stále více aktuální až do dnes.

Vůle něco dělat se současným stavem je zvláště patrná v oblastech s vyšší životní úrovní. Tedy v Evropě, různých částech Ameriky, převážně na severní polokouli a některých částech Asie.

Velkým problémem se stávají obtížně odbouratelné složky odpadu. Je nutné zajistit, aby nedocházelo k neustálé kontaminaci životního prostředí případně k stále větším a větším záborům či znehodnocování půdy na úkor nakládání s odpadem.

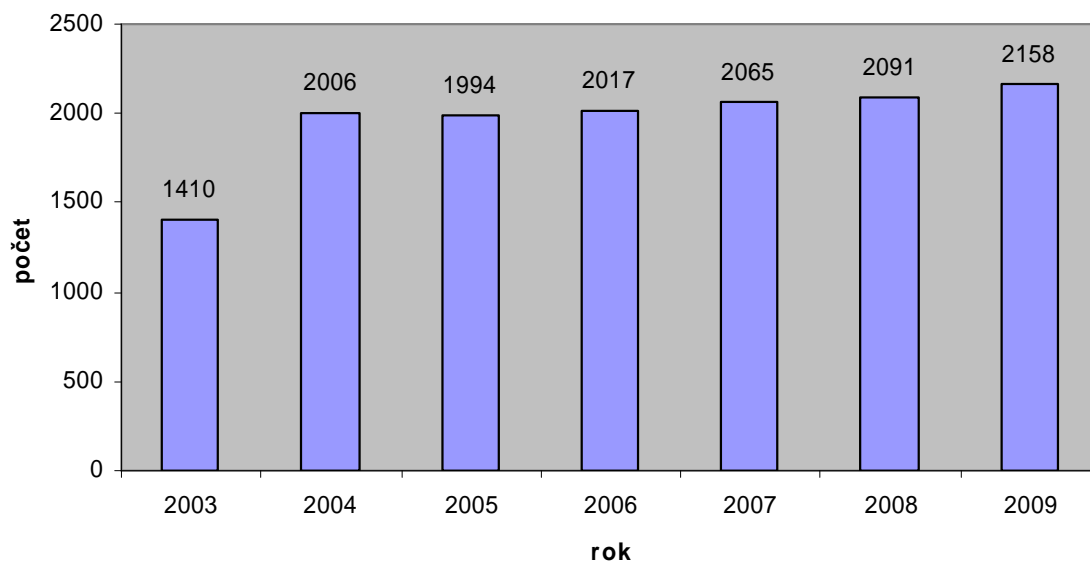
Tato diplomová práce se zabývá problematikou jedné z možností zneškodňování a degradace čistírenských kalů. Jedná se o odpad vznikající při čištění odpadních vod (ČOV), ať už komunálních či průmyslových. Průmyslové kaly jsou materiály poměrně specifické a jsou zpravidla zpracovávány přímo v místě vzniku nebo likvidovány. Naproti tomu kaly z komunálních čistíren odpadních vod jsou problematikou často diskutovanou, protože až do nedávné doby byly z největší části skládkovány. To vzhledem k implementované evropské legislativě je výrazně omezováno a do budoucna bude zcela zakázáno, neboť čistírenský kal patří do skupiny biologicky rozložitelných odpadů.

Tato diplomová práce je zaměřena na možnost termické likvidace kalů, konkrétně na minimalizaci emisí při jejich spalování.

1.1 Nakládání s čistírenskými kaly v ČR

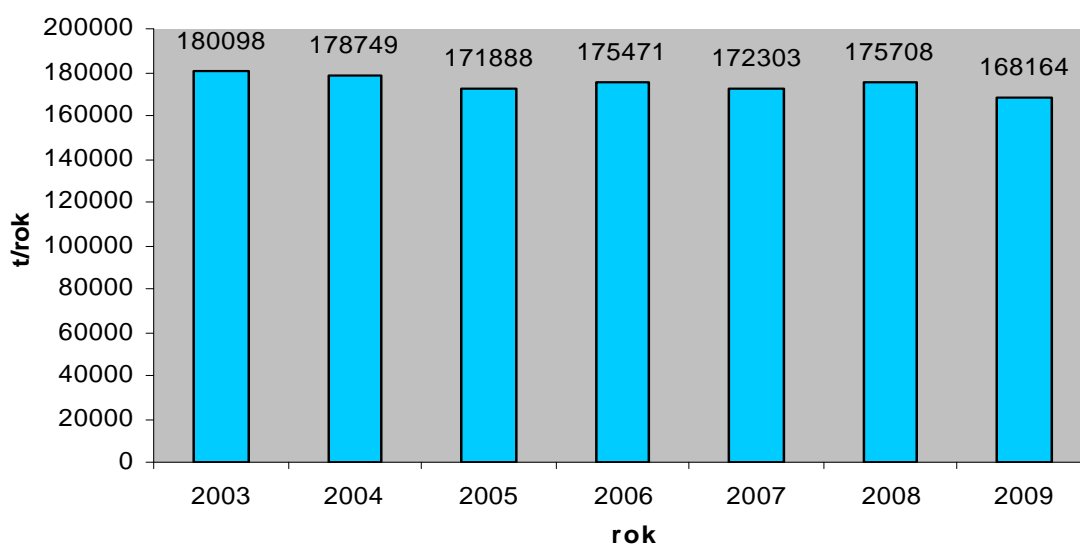
Problematické nakládání s čistírenskými kaly v České republice se věnují následující zákony případně jejich další novely. Záklon o odpadech 185/2001 Sb., případně jeho další novela 31/2011 Sb., dále vyhláška 381/2001 Sb., kterou se stanoví katalog odpadů, vyhláška 341/2008 Sb., o podrobnostech s nakládáním s biologicky rozložitelnými odpady, vyhláška 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, případně vyhláška 382/2001 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě, dále pak zákon o ochraně ovzduší 86/2002 Sb., případně další zákony české legislativy pro další způsoby využití čistírenských kalů.

Podle platné legislativy v obcích s počtem obyvatel nad 2000 musí být vybudováno zařízení na čištění odpadních vod. To je zvláště patrné na obr. 1, kde je jasně patrný čtvrtinový nárůst čistíren odpadních vod mezi lety 2003 a 2004. Trend pokračuje pozvolným dalším nárůstem.



Obr. 1 Množství komunálních ČOV v ČR v letech 2003-2009 [1]

Ačkoliv by se dalo očekávat, že produkce čistírenských kalů se bude zvětšovat se zvětšujícím se počtem čistíren odpadních vod, podle statistiky patrné z obr. 2 je vidět pozvolný střídavý pokles produkce sušiny. Přes jasný statistický trend je mezi veřejností se zvyšujícím se počtem ČOV stále očekáván nárůst produkce čistírenských kalů až k 200 000 t/rok.



Obr. 2 Produkce sušiny čistírenských kalů v ČR v letech 2003-2009 [1]

Způsobů dalšího nakládání s kaly je celá řada. Mezi nejčastěji preferované patří: přímá aplikace na zemědělskou půdu a rekultivace, kompostování, skládkování. Mezi rozvíjející se způsoby lze zařadit například spalování nebo případné využití ve stavebnictví.

Jak je s kaly nakládáno v České republice je patrné z tabulky 1. Z tabulky je patrné, že výsadní způsob zneškodňování čistírenských kalů je kompostování, hned po tom přímá aplikace a rekultivace, zde je patrný pozvolný nárůst oproti roku 2003. Část kalů je též likvidována pomocí skládkování, ale je vidět příznivý klesající trend způsobený především legislativou a vyšší cenou.

Rok	Kaly produkované v ČOV celkem	Způsob zneškodnění kalu				
		Přímá aplikace a rekultivace	Kompostování	Skládkování	Spalování	Jinak
2003	180 098	31 298	88 678	23 305	390	36 427
Zastoupení [%]	100,00	17,38	49,24	12,94	0,22	20,23
2009	168 164	42 442	80 727	5 931	2 179	36 885
Zastoupení [%]	100,00	25,24	48,00	3,53	1,30	21,93

Tab.1 Způsoby zneškodňování kalu v letech 2003 a 2009 [1]

Spalování, hlavní téma této práce se ukazuje zatím minimálně zastoupeno, přesto je vidět malý nárůst v celkovém zastoupení mezi lety 2003 a 2009 zhruba o jedno procento. Nejedná se zatím v České republice o běžný a plně rozvinutý způsob zneškodňování čistírenských kalů. V provozním měřítku jsou spalovány pouze kaly z ČOV Brno-Modřice a ČOV Jihlava.

Z vývoje let 2003 a 2009 je patrna mírná snaha o efektivní využití kalů na úkor jejich prostého skládkování. Jelikož kaly obsahují značné množství znečišťujících látek, jejich další využívání např. při rekultivaci nebo jako hnojivo se stává problematickým. Proto jsou hledány stále další způsoby. Jednou z možností částečné degradace a využití je právě již zmiňované spalování.

2. Termické zpracování kalů

Termické zpracování kalů se ukazuje jako perspektivní způsob nakládání s kaly. [2] Co přináší, způsoby jeho realizace a porovnání s jinými způsoby degradace čistírenského odpadu jsou rozebrány v následujících kapitolách tohoto textu.

2.1 Výhody termického zpracování

Jako termické zpracování kalů lze označit více technologií, nemusí to být pouze prosté spalování či spolu spalování. Může se jednat také o mokrou oxidaci, zplyňování, pyrolýzu, či jiné samostatné nebo kombinované technologie. V rámci práce se uvažuje především o procesu samostatného spalování či spolu spalování. Spalování materiálu, v tomto případě čistírenského kalu má obecně následující výhody:

- + Snižování objemu a váhy materiálu
- + Možnost efektivního čištění a zachycení nežádoucích produktů spalování
- + Další efektivní využití energie obsažené v palivu
- + Výsledný popel je inertní materiál s nižším obsahem nežádoucích látek

Tyto výhody pádně mluví ve prospěch spalování čistírenských kalů. Obecně lze říci, že spalování je považováno za jeden z nejvíce šetrných způsobů nakládání s kalem vzhledem k životnímu prostředí.

Dalšími činiteli mluvícími ve prospěch spalování jsou fakta týkající se ostatních způsobů nakládání s kaly. Jsou to především jejich negativa. V případě přímé aplikace na půdu v zemědělství jsou to hlavně nežádoucí efekty jako je kontaminace půdy, která může být následně spojena s kontaminací povrchových a spodních vod a následným přechodem nebezpečných látek do potravního řetězce. Tomuhle případu se naše společnost z logických důvodů snaží vyhnout a proto jsou zavedeny směrnice upravující množství nežádoucích látek obsažených v čistírenských kalech, jenž mohou být použity k přímé aplikaci a nebo ke kompostování. (hodnoty uvedeny v tabulce 2) Přesto je přímá aplikace a kompostování nejrozšířenější právě kvůli nízkým nákladům pro ČOV.

Ve své podstatě výše zmíněné platí i pro rekultivaci a ukládání čistírenských kalů na skládkách. Tedy dochází k záboru a degradaci půdy a vody nacházející se v okolí skládek. Zde se opět projevuje spalování jako výhodnější varianta z důvodu možného skládkování popele, který zabírá méně místa a není ve větší míře toxický. Další nevýhodou skládkování stabilizovaného kalu je trend zvyšujících se poplatků za uložení odpadu. Právem je skládkování označováno za nejhorší způsob nakládání s kalem. Dle tabulky 1 je patrný pozitivní trend ve snižujícím se množství skládkovaného materiálu. Stejně jako pro použití na zemědělské půdě je pro

skládání na skládkách spolu s ostatním odpadem a rekultivaci předepsáno vyhláškou množství nežádoucích látek obsažených v čistírenském kalu. Tato množství jsou pro ilustraci uvedeny v tabulce 3.

Prvek	přímá aplikace na půdu [mg/kg sušiny]		surovina pro výrobu kompostu [mg/kg sušiny]
	382/2001 Sb.	86/278/EEC	ČSN 46 5735
As	30	-	50
Cd	5	20-40	13
Cr	200	-	1000
Cu	500	1000-1750	1200
Hg	4	16-25	10
Ni	100	300-400	200
Pb	200	750-1200	500
Zn	2500	2500-4000	3000

Tab. 2 Limitní obsahy těžkých kovů v kalech pro použití v zemědělství [2]

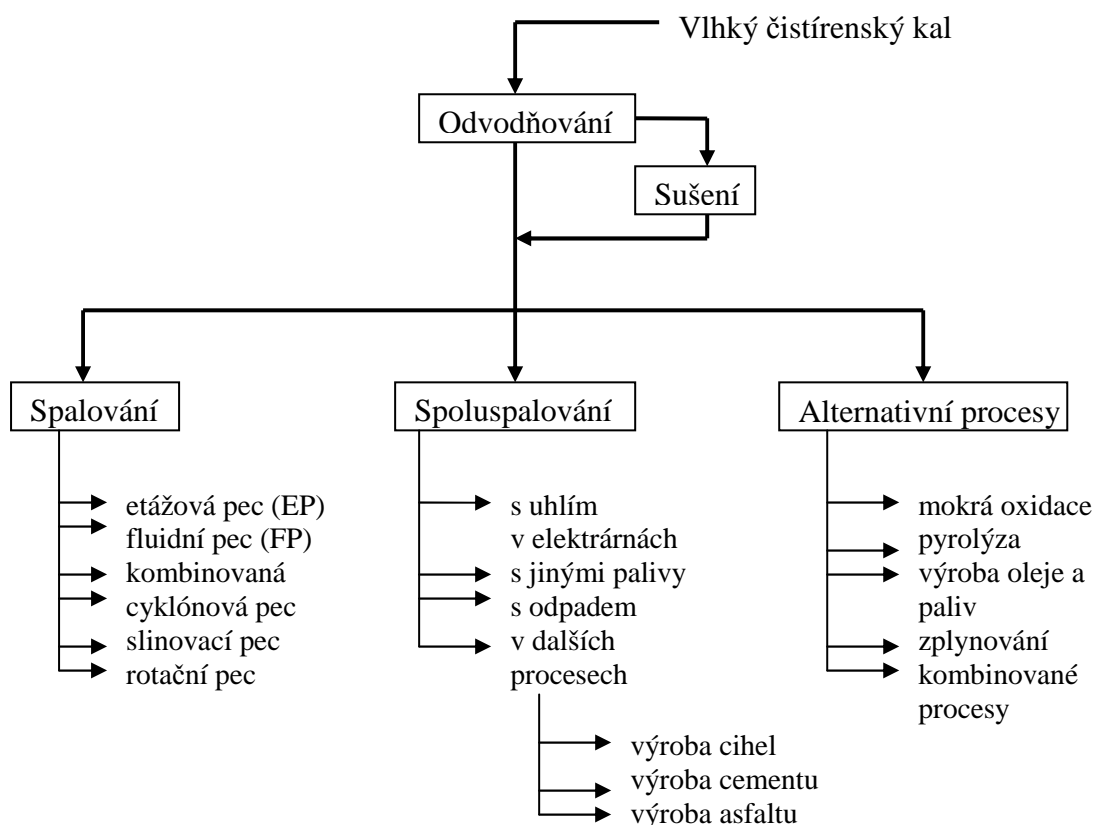
Ukazatel	výluh I, terenní úpravy [mg/l]	výluh II, rekultivace skládek [mg/l]	výluh III, skládka S-O [mg/l]
As	0.05	0.1	5
Cd	0.005	0.05	0.5
Cr	0.1	1	50
Cu	0.5	1	
Hg	0.002	0.005	0.05
Ni	0.1	0.5	50
Pb	0.1	0.5	10
Zn	5	5	
PCB	0.2 mg/kg	10 mg/kg	<20 mg/kg
Mikrobiální rozbor	Nesmí mít nebezpečnou vlastnost	Nesmí mít nebezpečnou vlastnost	Nesmí mít nebezpečnou vlastnost

Tab. 3 Limitní hodnoty ukazatelů výluhu [3]

Problematice termického nakládání s čistírenskými kaly se dále věnuje [2], [4], [5].

2.2 Průmyslová zařízení pro spalování čistírenského kalu

Pro termické využívání odvodněného, popřípadě v následujícím kroku ještě vysušeného čistírenského kalu jsou používána zařízení jenž jsou podle obrázku 3 dělena podle tří základních směrů podle toho jestli se jedná o prosté spalování, spalování případně alternativní procesy.



Obr. 3 Různé směry termického zpracování kalů [6]

2.3 Přehled základních zařízení používaných pro spalování čistírenských kalů

Pro prosté spalování čistírenských kalů jsou pravděpodobně nejvíce využívány zařízení jež budou podrobněji popsána v následujících podkapitolách. Jsou to: pec s fluidním ložem, etážová pec a kombinovaná etážová pec s fluidním ložem. Provozní a technické charakteristiky zmiňovaných pecních technologií jsou zmíněny v tabulce 4.

	Pec s fluidním ložem	Etážová pec	Etážová pec s fluidním ložem
Hlavní technické charakteristiky	Žádné mechanické pohyblivé části a nízké opotřebení.	<ul style="list-style-type: none"> • Není nutné žádné samostatné předběžné sušení • Extenzivní pecní struktura s pohyblivými částmi • Chlazen 	<ul style="list-style-type: none"> • Není nutné žádné samostatné předběžné sušení • Pohyblivá dutá šachta • Malý objem fluidního lože
Provozní hlediska	Rychlá fáze startovací i zastavení provozu s krátkou dobou ohřevu a chlazení, možné přerušení provozu	Nezbytná dlouhá doba ohřevu, kontinuální provoz	Střední doba ohřevu a chlazení
Možné provozní problémy	Shlukování, defluidizace	Pohyblivé díly pece	Možné emise organických látek, pohyblivé díly pece
Hlavní charakteristiky spalovacího stupně	<ul style="list-style-type: none"> • Požadován malý přebytek vzduchu • Dokonalé spalování pouze nad fluidním ložem 	<ul style="list-style-type: none"> • Obtížná kontrola spalování • Odolná změnám zatížení i vůči hrubým materiálům 	<ul style="list-style-type: none"> • Potřebný malý přebytek vzduchu • Dobrá kontrola spalování • Dokonalé spalování ve fluidním loži • Větší odolnost vůči výkyvům v kvalitě kalu než u pecí s fluidním ložem
Obsah popele ve spalinách	Vysoký	Nízký	Vysoký
Odstraňování popele	V proudu spalin a pomocí písku	Přímo z nejnižší vrstvy	V proudu spalin a pomocí písku
Zbytky	<ul style="list-style-type: none"> • Popel • Materiál fluidního lože 	<ul style="list-style-type: none"> • Popel 	<ul style="list-style-type: none"> • Popel • Materiál fluidního lože

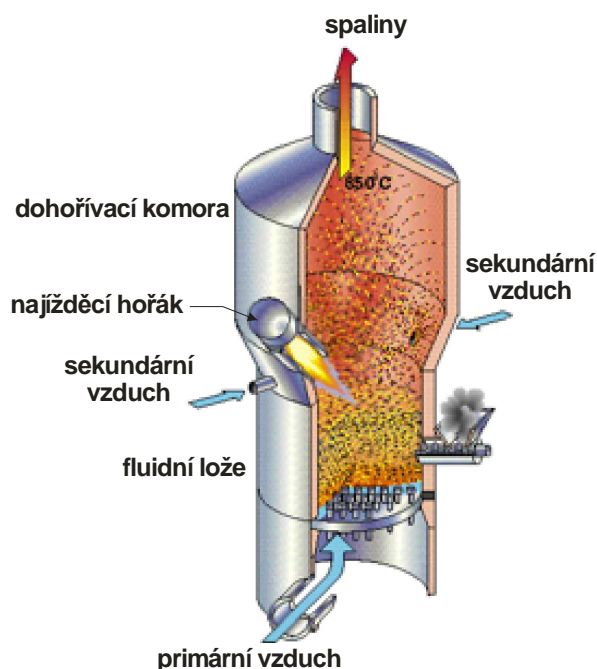
Tab. 4 Porovnání pecních systémů pro spalování čistírenských kalů [7]

Podle tabulky se jako výhodný způsob spalování jeví proces v kombinované etážové peci s fluidním ložem pro výhody vzniklé spojením technologií z fluidní pece a pece etážové. Další její nezanedbatelná výhoda je, že není nutno palivo samostatně předsušovat a tudíž zavádět přídatnou předsušovací jednotku jako tomu může být v případě pece s fluidním ložem.

2.3.1 Pec s fluidním ložem

Spalovny s fluidním ložem jsou vhodné pro spalování homogenních materiálů, proto jsou vhodné i pro spalování čistírenských kalů. Spalovací komora je válcového tvaru, ve spodní části je umístěn rošt, nad kterým se pomocí vháněného vzduchu vytváří fluidní lože z inertního materiálu. Tím může být buď písek, nebo popel vznikající spalováním kalu. Ve fluidním loži probíhají všechny fáze spalování (sušení, vznícení i hoření). Spalovny s fluidním ložem umožňují dobrý přestup tepla, ve fluidní vrstvě je zajištěno dobré prohoření kalu díky rovnoměrnému přístupu kyslíku. Teplota ve vrchních částech fluidní vrstvy se pohybuje v rozmezí 760 až 820 °C. [4]

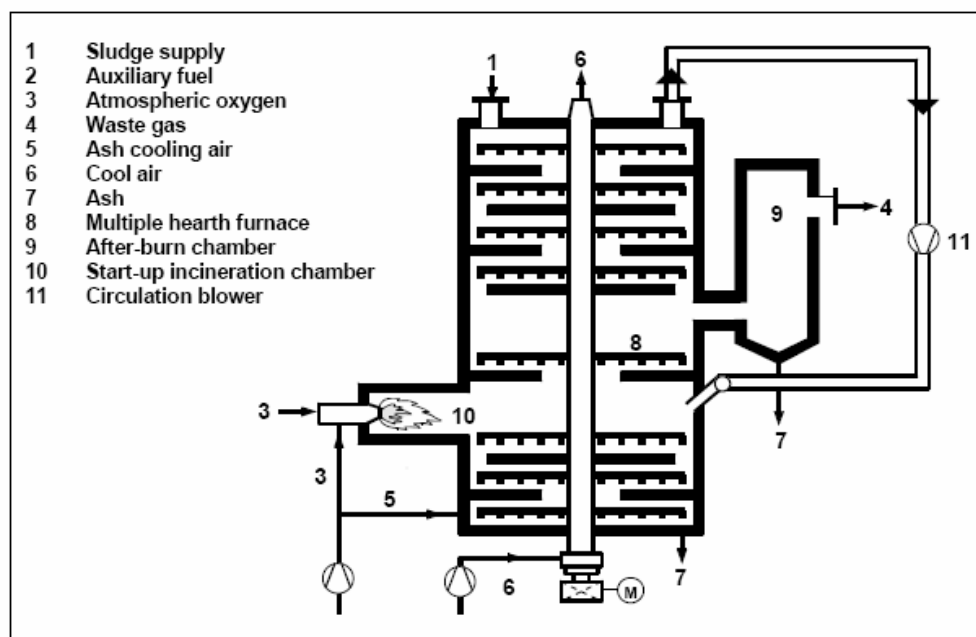
Základní schéma pece s fluidním ložem je názorně ukázáno na obrázku 4. Pro spalování ve fluidním loži se dále úspěšně používá modifikace fluidní pece, kde je za pecí zařazen tzv. recyklační cyklon, který vrací některé ochlazené částice popele zpět do spalovací komory. Použitím této metody je možno regulovat odvod tepla. [7]



Obr. 4 Spalovna kalů pracující na principu fluidního lože [5]

2.3.2 Etážová pec

Etážové pece jsou válcového tvaru s vestavěnými patry. Kal je přiváděn na horní patro etážové pece. Ve vrchních částí pece je kal nejprve předsušen odcházejícími spaliny, postupně propadá na nižší patra, kde dochází ke vzplanutí a hoření. U dna pece je odebrán popel. Etážové pece jsou díky své konstrukci vhodné pro spalování vlhkých (pouze odvodněných) kalů. [4]

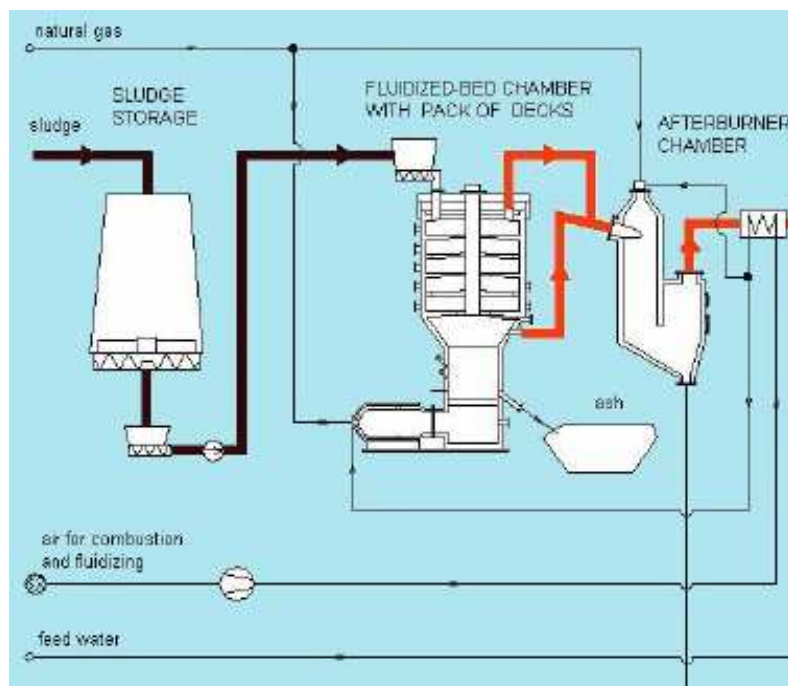


Obr 5. Základní funkce etážové pece, 1 – přívod kalu, 2 - přídavné palivo, 3 - spalovací vzduch, 4 – spaliny, 5 - vzduch k chlazení popela, 6 – popel, 7 - cirkulační plyn, 8 - etážová pec, 9 - dohořivací komora, 10 - najížděcí spalovací komora [7]

2.3.3 Etážová pec s fluidním ložem

Etážové pece s fluidním ložem spojují technologie pecí se samostatným fluidním ložem a etážových pecí. Schéma a funkce etážové pece jsou znázorněny na obrázku č. 6.

Spodní část je tvořena fluidní vrstvou, kam propadávají a následně hoří předsušené kaly. Vznikající spaliny procházejí vrchní částí pece, která je tvořena etážemi. Na těchto patrech dochází k předsušení kalu. Při spalování vlhkých kalů je výhodou této kombinace, že do fluidní vrstvy přichází až vysušený kal. Fluidní vrstva tak může být objemově menší, než by tomu bylo u samotné fluidní spalovny. [4]



Legenda obrázku:

natural gas

sludge

sludge storage

air for combustion and fluidizing

fluidized-bed chamber with pack of decks

ash

afterburner chamber

-zemní plyn

-kal

-zásobník kalu

-spalovací a fluidizační vzduch

-fluidizační komora s etážemi

-popel

-dohořivací komora

Obr. 6 Kombinace etážové pece s fluidním ložem [8]

3. Čištění spalin

Čištění spalin je nedílnou součástí každého průmyslového procesu, kde dochází ke spalování paliv, ať už jsou to paliva plynná pevná nebo kapalná. Během spalování dochází k uvolňování celé řady nežádoucích plynů, oxidů, kyselých sloučenin, jedovatých uhlovodíků, pevných látek, těžkých kovů a dalších. Jedná se především o následující látky: [9]

- oxid uhelnatý - CO
- oxidy síry - SO₂ a SO₃
- oxidy dusíku - NO_x (NO, N₂O, NO₂)
- organické látky, persistentní organické polutanty (POP), které zahrnují polyaromatické uhlovodíky (PAU), polychlorované bifenylly (PCB), polychlorované dibenzodioxiny (PCDD) a polychlorované dibenzofurany (PCDF) (tzv. dioxiny a furany)
- tuhé znečišťující látky (TZL)
- těžké kovy
- halogenovodíky (HF, HCl, HBr)

3.1 Emisní předpisy pro spalování čistírenských kalů vycházející z legislativy

Jako pro všechna průmyslová odvětví jsou i pro zplodiny vznikající spalováním odpadů stanoveny právně závazné normy vycházející z nařízení státu. Pro případ České republiky to je nařízení vlády č. 354/2002 Sb., kterým se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadů. [10] V případě Evropské unie se emisním limitům pro spalování čistírenských kalů věnuje směrnice 2000/76/EC. [19] Ke stejné problematice je v Německu vydáno nařízení 17.BImSchV.[16] Dále za zmínku stojí nařízení vlády č. 350/2002 Sb. [17], kterým se stanoví emisní limity a podmínky a způsob sledování, posuzování, hodnocení a řízení kvality ovzduší a 356/2002 Sb., vyhláška ministerstva životního prostředí, kterou se stanoví seznam znečišťujících látek, obecné emisní limity, způsob předávání zpráv a informací, zjišťování množství vypouštěných znečišťujících látek, trvanlivosti kouře, přípustné míry obtěžování zápachem a intenzity pachů, podmínky autorizace osob, požadavky na vedení provozní evidence zdrojů znečišťování ovzduší a podmínky jejich uplatňování. [18]

Ve výše zmíněných nařízeních jsou stanoveny především emisní limity pro výstupy těžkých kovů, jež jsou publikovány v tabulce č. 5, polychlorované dibenzodioxiny (PCDD) a polychlorované dibenzofurany (PCDF) též znázorněné

v tabulce č. 5. Dále to jsou uváděny limity pro TZL, TOC, HCl, HF, SO₂, NO₂, CO, jež jsou uvedeny v tabulce č. 6.

	354/2002 Sb.		17. BImSchV as at 2009/01		2000/76/EC	
Hg	0,05 mg/m ³		0,05 mg/m ³		0,05 mg/m ³	
Cd a jeho sloučeniny	Σ 0,5 mg/m ³		Σ 0,5 mg/m ³		Σ 0,5 mg/m ³	
Ti a jeho sloučeniny						
Co a jeho sloučeniny	X	Σ 0,5 mg/m ³	X	Σ 0,5 mg/m ³	X	Σ 0,5 mg/m ³
Cr a jeho sloučeniny	X		X		X	
Cu a jeho sloučeniny	X		X		X	
Mn a jeho sloučeniny	X		X		X	
Ni a jeho sloučeniny	X		X		X	
Pb a jeho sloučeniny	X		X		X	
Sb a jeho sloučeniny	X		X		X	
Sn a jeho sloučeniny	-		X		-	
V a jeho sloučeniny	X		X		X	
As a jeho sloučeniny	X		X		X	
Dioxiny a furany *	0,1 ng TE/m ³		0,1 ng TE/m ³		0,1 ng TE/m ³	

* Pro PCDD a PCDF doba odběru vzorku nejméně 6 hodin a nejvýše 8 hodin

Tab. 5 Specifické emisní limity pro spalování odpadů, průměrné hodnoty odběru vzorků nejméně 30 minut a nejvýše 8 hodin [10], [16], [19]

Hodnoty v tab. 5 jsou uváděny pro referenční obsah kyslíku ve spalinách 11 %. V případě PCDD a PCDF ke stanovení součtové hodnoty se hmotnostní koncentrace jednotlivých látek tvořících jako celek PCDD a PCDF před sečtením násobí koeficienty ekvivalentů toxicity (TE). Tyto koeficienty jsou uvedeny v [10].

Z tabulky je patrné, že emisní limity stanové vládou České republiky pro těžké kovy, dioxiny a furany jsou shodné s emisními limity pro Evropskou unii. Z výše porovnávaných legislativních předpisů vybočuje Německo, kde jsou na rozdíl od České republiky sledovány navíc i emise cínu (Sn).

	354/2002 Sb.
Tuhé znečišťující látky celkem (TZL)	10 mg/m ³
Organické látky v plynné fázi vyjádřené celkovým obsahem organického uhlíku (TOC)	10 mg/m ³
Plynné sloučeniny chloru vyjádřené jako HCl	10 mg/m ³
Plynné sloučeniny fluoru vyjádřené jako HF	1 mg/m ³
Oxid siřičitý (SO ₂)	50 mg/m ³
Oxid dusnatý a dusičitý vyjádřený jako NO ₂ pro stávající spalovny o jmenovité kapacitě nad 6 t/h a nové spalovny	200 mg/m ³
Oxid dusnatý a dusičitý vyjádřený jako NO ₂ pro stávající spalovny o jmenovité kapacitě do 6 t/h	400 mg/m ³
Oxid uhelnatý (CO)	50 mg/m ³

Tab. 6 Specifické emisní limity pro spalování odpadů, průměrné denní hodnoty [10]

Hodnoty v tabulce č. 6 jsou uvedeny pro referenční obsah kyslíku ve spalínách 11 %. Hodnoty emisních limitů pro Evropskou unii podle směrnice 200/76/EC se shodují s hodnotami pro ČR.

Pro přepočet výsledků měření na referenční obsah kyslíku je legislativou zaveden následující vzorec: [10]

$$E_S = \frac{21 - O_S}{21 - O_M} \times E_M \quad (1)$$

Kde:

E_S - Přepočtená hodnota emisní koncentrace na referenční obsah kyslíku [mg/m_N³]

O_S - Referenční obsah kyslíku [%]

O_M - Naměřený obsah kyslíku [%]

E_M - Naměřená koncentrace [mg/m_N³]

3.2 Způsoby čištění spalin a jejich kombinace

Systémy čištění spalin jsou sestaveny jako kombinace jednotlivých procesních jednotek, které společně vytvářejí úplný systém čištění spalin. [7]

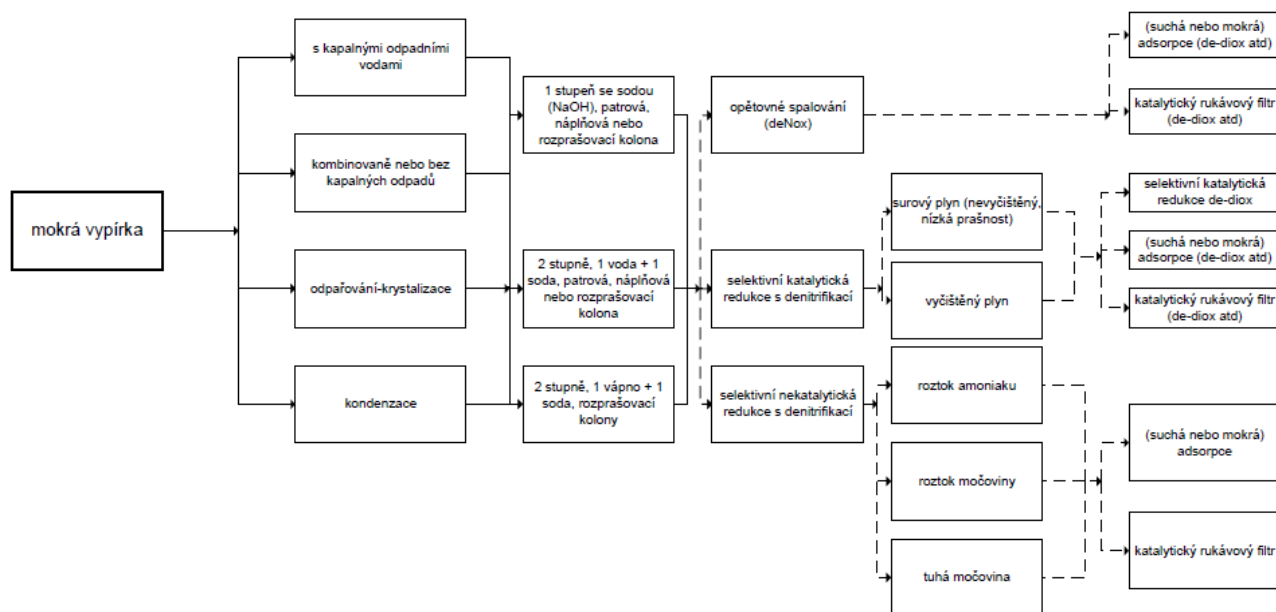
Jako jednotkové operace jsou využívány rozdílné způsoby zneškodňování mající svůj základ ve fyzikálních či chemických postupech.

Pro uvedení do problematiky je uveden základní přehled použitých technologických operací pro čištění spalin [9]:

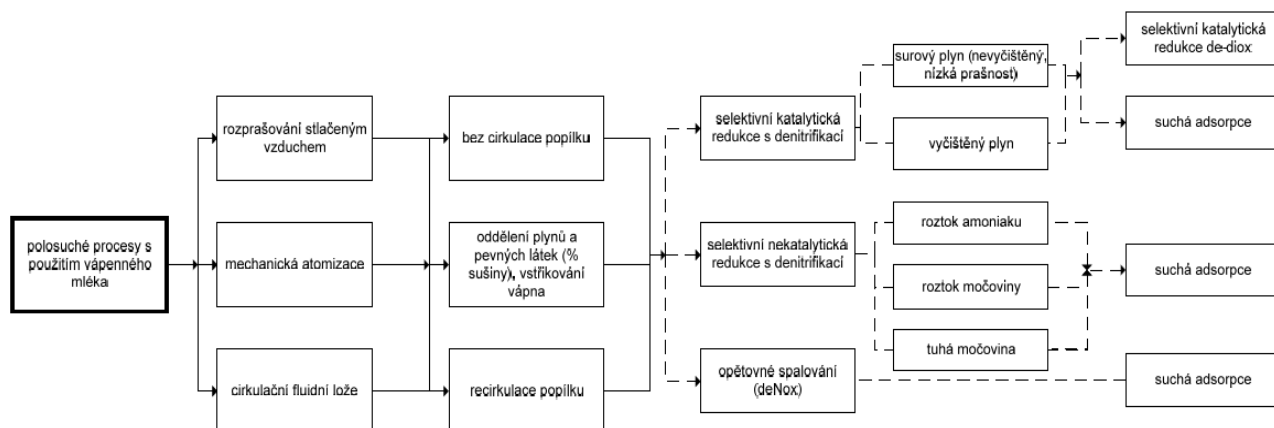
- a) Řízení procesu spalování
- b) Mechanické pochody
 - Elektrostatický odlučovač, látkový filtr
- c) Chemické a chemicko-fyzikální pochody
 - Absorpce, (mokrý vypírka plynů)
 - Polosuchá vypírka spalin
 - Suché čištění spalin (podrobně popsáno v kap. 3.3)
 - Adsorpce na sorbetech
 - Katalytický rozklad dioxinů
 - Katalytické, respektive nekatalytické odstraňování NO_x

Na základě výše zmíněného vyplývá, že způsoby čištění jednotlivých složek spalin je možno různě kombinovat v dosti případech dokonce nezávisle na sobě jak je uvedeno v následujících obrázcích 7 až 9.

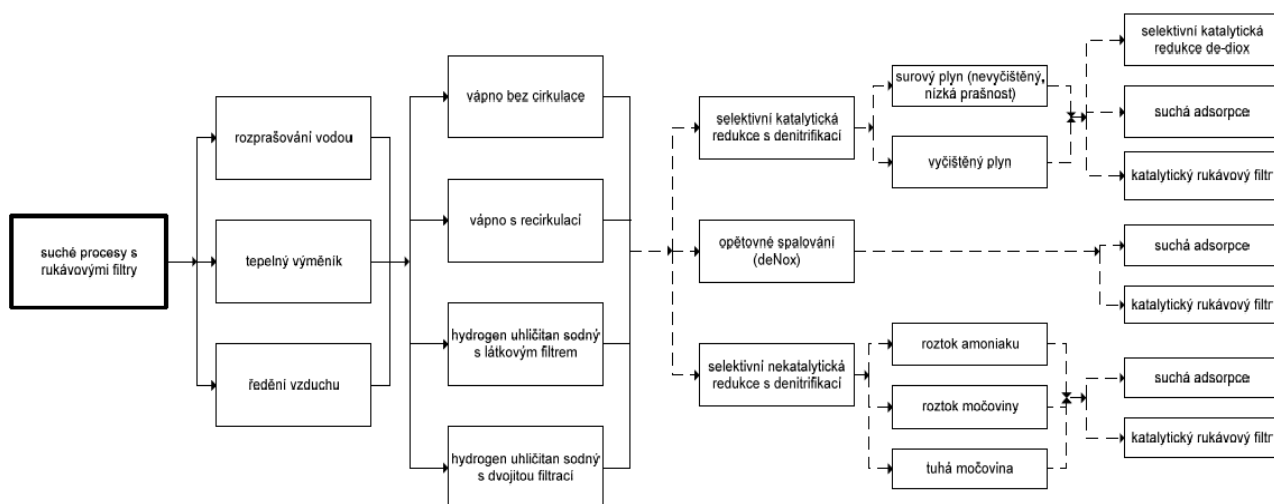
Pro případ níže uvedených tabulek existuje 408 možností jak zmíněné systémy kombinovat. [7]



Obr. 7 Přehled potencionálních kombinací systému čištění spalin technologií mokrého čištění spalin [7], [9]



Obr. 8 Přehled potencionálních kombinací systému čištění spalin technologií polosuchého čištění spalin [7], [9]



Obr. 9 Přehled potencionálních kombinací systému čištění spalin technologií suchého čištění spalin [7], [9]

Pro čištění spalin existuje mnoho různých možností, jelikož je tato práce a prováděný experiment zaměřen na využití suché vápencové metody, je následující kapitola věnována popisu právě této metody čištění spalin.

3.3 Suchá vápencová metoda

Jedná se především o metodu odsiřování. Pro odsiřování suchou vápencovou metodou se nejčastěji používají dva základní postupy: technologie odsiřování spalin jemně mletým vápencem v kotlích a odsiřování spalin ve fluidní vrstvě. Pro první postup je potřeba vysoká jemnost mletí vápence (až 100 procent

pod 100 mikronů). Nedostatkem tohoto postupu je nízká účinnost odsiřování spalin při vysoké spotřebě aditiva a problémy s využitím a ukládáním odpadu. [12]

Odsiřování ve fluidní vrstvě může probíhat buď ve fluidním reaktoru zařazeném za klasický kotel anebo přímo ve fluidním ohništi, kdy spalování paliva a odsiřování probíhá současně, což je i případ prováděného experimentu. První řešení, tedy odsiřování ve fluidním reaktoru za kotlem bývá v praxi použito pro případ dodatečného snížení SO₂. [12]

V celém procesu nastává nejprve tepelný rozklad vápence, kdy vzniká oxid vápenatý (CaO) a oxid uhličitý (CO₂):



Poté následuje absorpce oxidu siřičitého (SO₂) za přítomnosti kyslíku:



Účinnost odsíření závisí především na teplotě a tlaku ve vířivé vrstvě, na jakosti sorbentu (stáří, reaktivita, jemnost mletí), jeho koncentraci a na době styku reagentu. [12]

Přítomnost vápence ve fluidní vrstvě má příznivý vliv i na tvorbu kyseliny chlorovodíkové (HCl) a kyseliny fluorovodíkové (HF):



Literatura uvádí, že je možno vázat až 50% HCl a 90% HF. Účinnost odsíření závisí především na teplotě a tlaku ve vířivé vrstvě, na jakosti sorbentu (stáří, reaktivita, jemnost mletí), jeho koncentraci a na době styku reagentu. [12]

Kotle roštové			
Poměr Ca/S	1	1.6	2
Účinnost [%]	42	60	66
Fluidní kotle			
Poměr Ca/S	1	2	3
Účinnost [%]	30-49	53-80	67-97

Tab. 10 Účinnost odsíření při použití suché aditivní metody [12]

Výhodou suché aditivní metody oproti metodám mokrého čištění je absence odpadní vody z procesu čištění spalin.

4. Experimentální část

Jak již bylo výše zmíněno je spalování čistírenských kalů doprovázeno produkcí emisí nežádoucích látek. Zvýšená produkce těchto látek je ovlivněna především charakteristikou složení čistírenského kalu, ve kterém se ve srovnání s běžnými palivy jako je hnědé a černé uhlí vyznačuje zvýšeným obsahem látek jako je síra, chlor, fluor případně fosfor.

Hlavní náplní experimentu je ověření působení vápenatých sloučenin na množství oxidů síry, halogenovodíků a složek těžkých kovů přecházejících do spalin. Jako reakční činidlo byl v experimentu použit vápenec, který je schopen na sebe vázat síru obsaženou v palivu a tím účinně snižovat tvorbu oxidů síry a posléze též tvorbu kyseliny sirové.

4.1 Experimentální zařízení

Pro potřebu uskutečnění experimentu bylo zvoleno experimentální zařízení pracující na principu fluidního reaktoru. Dominantní částí celého zařízení je válcová spalovací komora, jejíž průměr je zhruba 100 mm. Celá spalovací komora je obložena silnou vrstvou izolačního materiálu, jenž má za účel bránit přílišnému odvodu tepla v okolí spalovací komory. Přestože je izolace silná dochází u experimentálního zařízení k daleko větším únikům tepla jako je tomu u zařízení průmyslových.

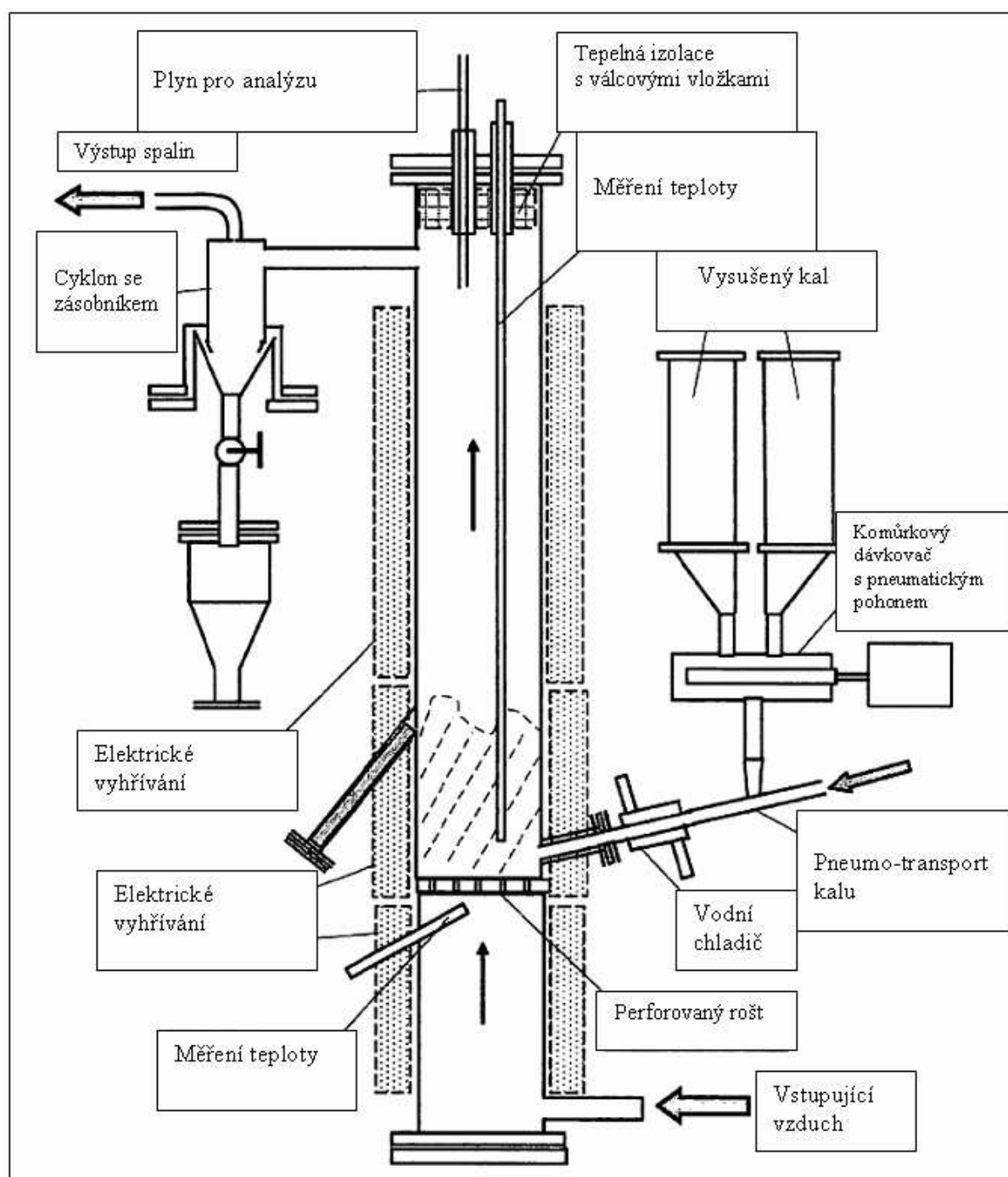
Ve spodní části spalovací komory se nachází perforovaný rošt jenž zadržuje tzv. fluidní vrstvu spalovaného materiálu. Spalovací vzduch je vháněn do spalovací komory v spodní části. Dále prochází přes perforovaný rošt a uvádí palivo do stavu fluidizace, kde se též účastní spalovací reakce. Spalovací vzduch je těsně předtím než vstoupí do fluidní vrstvy předehříván na požadovanou teplotu pomocí elektrických topných těles.

Teplota fluidní vrstvy je regulována jednak pomocí předehřevu spalovacího vzduchu a hlavně také pomocí topných těles umístěných po stranách spalovací komory. Teploty v jednotlivých částech aparátu jako jsou teplota fluidní vrstvy, freeboardu, předehřevu, hlavy spalovací komory a další jsou elektronicky měřeny a zaznamenávány pomocí termočlánků.

Dávkové palivo je dodáváno do prostoru spalovací komory v místech těsně nad roštem. Vyhořelé palivo je dále odváděno přepadem do zásobníku na popel. Výška fluidní vrstvy je dána výškou vyústění do přepadu od roštu.

Spaliny spolu s popílkem jsou odváděny v horní části spalovací komory a jsou potrubím propojeny s horkým cyklonem, který odseparovává popílek, jenž je zachycován do zásobníku pod cyklonem. Za cyklonem následuje vedení z něhož jsou odebírány části vzorků spalin. Spaliny jsou dále chlazeny v protiproudém trubkovém výměníku s uspořádáním trubka v trubce. Chladícím médiem je voda. Součástí výměníku je i zásobník, kde je zachycován kondensát vody a kyseliny sirové. Poté následuje ještě pár míst ve vedení pro odběr chladných spalin a

následně jsou produkty spalování odvedeny do komína. Celé schéma je znázorněno na obrázku 10, snímek experimentálního zařízení je na obrázku 11.



Obr. 10 Experimentální pec s fluidním ložem pro spalování čistírenských kalů [11]



Obr. 11 Experimentální zařízení

4.1.1 Dávkování paliva

Správné dávkování je důležitá součást prováděného experimentu. Zajištění jeho bezproblémového chodu může být provázeno jistými obtížemi.

Pro experiment bylo použito pneumaticky ovládaného komůrkového dávkovače. Dávkovací mechanismus se skládá z pravého a levého zásobníku. Vyústění zásobníků směřuje rovnoběžně do tělesa dávkovače. Uvnitř dávkovače se nachází plastová destička v níž jsou vyvrtány dvě průchozí komůrky. Destička je pomocí pneumatického pohonu uvedena do reverzního pohybu, čímž je dosaženo, že přes jednotlivé průchozí komůrky je střídavě v určitém intervalu dávkováno palivo z pravého a levého zásobníku. Dávkování tedy není kontinuálním procesem. Pro experiment na základě minulých zkušeností obsluhy zařízení byla použita výchozí perioda dávkování 2,6 sekundy. To znamená, že dávky z komůrek odcházely do spalovací komory v intervalu 1,3 sekundy.

Množství dávkovaného paliva je pro experiment primárně regulováno velikostí průměru komůrky v destičce, sekundární regulace je zajištěna možností změny periody dávkování.

Pro experiment spalování čistírenských kalů byl distribuován kal do pravého i levého zásobníku. Pro následující experiment spalování čistírenských kalů s vápencem byl distribuován kal do levého zásobníku a do pravého zásobníku byl distribuován vápenec. Dávkování kalu a vápence tedy probíhalo střídavě a pro oba experimenty byly použity destičky s rozdílnými velikostmi průměrů komůrek.



Obr. 12 Dávkovací zařízení

V horní části obrázku číslo 12 jsou patrný pravý a levý zásobník paliva. Naopak ve spodní části je vidět komůrkový dávkovač a napojení na pneumatický pohon. Pro ověření stejnoměrnosti dávkování byly prováděny minutové odběry pro

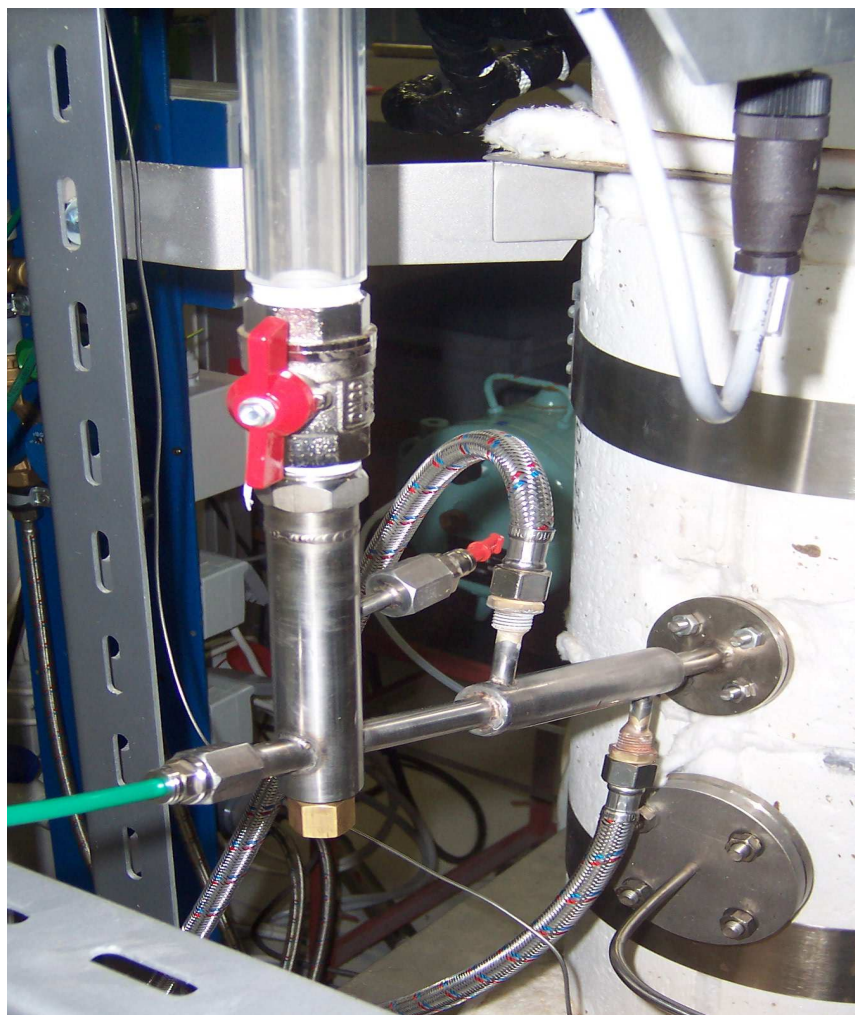
různé velikosti komůrek. Vždy 5 odběrů. Množství dávkovaného paliva prů různé velikosti komůrek pak bylo průměrem z těchto odběrů. Dávkování né vždy přivádělo konstantní množství po celé délce experimentu

4.1.2 Transport paliva

Transport paliva vypadávajícího z dávkovače do spalovací komory je řešen pomocí proudu dusíku. Palivo je unášeno rychle proudícím dusíkem ($1\text{m}_\text{N}^3/\text{h}$ při podmínkách okolí). Použití dusíku je odůvodněno jeho chováním vůči chemickému procesu spalování. Dusík je inertní a tudíž výrazně nenarušuje svým chováním průběh experimentu.

Samotnou dávkovací trubičku je v nejbližším okolí spalovací komory nutno chladit z důvodu, aby nedocházelo k možnému spékání spalovaného materiálu a tedy i ucpání transportní trasy a úplnému přerušení dávkování. To obstarává trubkový chladič, jehož chladícím médiem je proud vody.

Na obrázku 13 je znázorněn palivový dopravní uzel. Zelená hadička na levé straně obrázku je přívod transportního dusíku. Z horní strany přichází do uzlu dávkovaný kal. Těsně před vstupem do spalovací komory je patrný trubkový chladič.



Obr. 13 Palivový dopravní uzel

4.1.3 Měřicí a odběrové zařízení

Součástí experimentu jsou zařízení určená k odběru a vyhodnocení obsahu látek ve spalínách.

V místě mezi horkým cyklonem a chladičem byly primárně odebírány vzorky spalín, u kterých se vyhodnocovaly látky s řádově vyšší hodnotou teploty kondenzace než je teplota okolí. Mezi chladičem a komínem byly odebírány vzorky u kterých nemá teplota okolí vliv na jejich kondenzaci nebo případné složení spalín.



Obr 14 Místa odběru vzorků spalín mezi cyklonem a chladičem

Pro stanovení obsahu persistentních organických polutantů (POP), těžkých kovů, oxidu siřičitého (SO_2), kyseliny chlorovodíkové (HCl) a kyseliny fluorovodíkové (HF) byla použita manuální odběrová metoda u které jsou spaliny čerpány nejprve přes patronu obsahující silikagel jenž na sebe naváže všechnu vodu a dále jsou suché spaliny vedeny přes absorpční nádoby, kde jsou látky absorbovány do absorpčního roztoku. Pro absorpci HCl a HF byl použit roztok hydroxidu sodného (NaOH), pro absorpci SO_2 byl použit roztok peroxidu vodíku (H_2O_2), pro absorpci těžkých kovů byly použity roztoky kyseliny dusičné (HNO_3) s peroxidem vodíku a s manganistanem draselným (KMnO_4). Pro stanovení POPs byl použit roztok ethoxyethanolu. Doba a počet odběrů je závazně udáván normami pro odběry jednotlivých skupin znečišťujících látek.

Tohé znečišťující látky TZL byly zachytávány na filtr, který byl následně podrobován analýze.

Pro měření ostatních složek ve spalínách je použit kontinuální způsob měření pomocí analyzátoru plynů. Měření bylo provedeno pomocí analyzátoru firmy ABB, AL3020.

Spaliny jsou vedeny přes chladicí zařízení, jež spaliny uvede do stavu normálních podmínek a zbaví je vlhkosti, dále jsou vedeny přes analyzátor plynů. Naměřené hodnoty jsou kontinuálně zaznamenávány do souboru.



Obr. 15 a) Odběrové zařízení pro kontinuální stanovování plynných látek ve spalínách
b) Absorpční odběrová trat

4.1.4 Charakteristika paliva

Pro experiment je použit stabilizovaný čistírenský kal z ČOV Modřice. Experimentálně byly stanoveny některé jeho fyzikální vlastnosti, které jsou uvedeny v tabulce 11. Tyto vlastnosti byly určeny pro vzorek kalu č. 1. Složení kalou č. 1 je znázorněno v tabulce 12. Pro experiment byl využit také vzorek kalu 2, jehož složení je k dispozici v tabulce 13. Hodnoty v tabulce 12 jsou průměrné hodnoty z pěti měření a v tabulce 13 jsou průměrné hodnoty z 3 měření. Za povšimnutí stojí fakt, že kal 2 má o 2,5 % vyšší podíl hořlaviny v surovém stavu, větší koncentraci O_2 a nižší koncentraci síry.

Materiál	kal
Frakce (mm)	0.5-2.0
Střední velikost částic (mm)	1.25
Sypná hmotnost (g/l)	693
Zdánlivá hustota-Hg (g/l)	1542
Skutečná hustota-He (g/l)	1740
Porozita (%)	11%
Mezerovitost vrstvy (%)	45%

Tab. 11 Fyzikální vlastnosti čistírenského kalu č. 1

	čistírenský kal 1		
	surový	sušina	suchý a bezpopelnatý
vlhkost (hm. %)	8,59	-	-
hořlavina (hm. %)	50,38	55,11	100
popel (hm. %)	41,03	44,89	-
prchavá hořlavina (hm. %)	43,18	47,23	85,71
fixní uhlík (hm. %)	7,20	7,88	14,29
Q_s (MJ kg ⁻¹)	11,44	12,51	22,70
Q_i (MJ kg ⁻¹)	10,35	12,33	20,54
C (hm. %)	26,24	28,70	52,08
H (hm. %)	3,66	4,00	7,27
N (hm. %)	3,36	3,68	6,67
O (hm. %)	16,37	17,91	32,49
S_{celk} (hm. %)	0,750	0,820	1,490
S_{spal} (hm. %)	0,749	0,819	1,486
Cl (hm. %)	0,045	0,049	0,089
F (hm. %)	0,017	0,018	0,033
Br (hm. %)	0,002	0,002	0,003
P (hm. %)	2,39	2,62	4,75

Tab. 12 Složení vzorku čistírenského kalu č. 1

	čistírenský kal 2		
	surový	sušina	suchý a bezpopelnatý
vlhkost (hm. %)	8,61	-	-
hořlavina (hm. %)	52,87	57,85	100
popel (hm. %)	38,51	42,15	-
prchavá hořlavina (hm. %)	45,34	49,62	78,38
fixní uhlík (hm. %)	7,53	8,24	21,62
Q_s (MJ kg ⁻¹)	11,98	13,11	22,65
Q_i (MJ kg ⁻¹)	10,79	12,94	20,42
C (hm. %)	27,30	29,88	51,64
H (hm. %)	4,05	4,43	7,66
N (hm. %)	3,69	4,04	6,98
O (hm. %)	17,15	18,77	32,44
S_{celk} (hm. %)	0,680	0,740	1,280
S_{spal} (hm. %)	0,653	0,715	1,236
Cl (hm. %)	0,053	0,058	0,101
F (hm. %)	0,014	0,016	0,027
Br (hm. %)	0,002	0,002	0,003
P (hm. %)	2,75	3,01	5,20

Tab. 13 Složení vzorku čistírenského kalu č. 2

Pro experiment byl jako aditivum k palivu použit čížkovický vápenec, jehož složení je parné v tabulce 14.

Čížkovický vápenec	
Složka	Hmotnostní %
CaO	43,21
SiO₂	12,92
Al₂O₃	5,01
Fe₂O₃	1,65
K₂O	0,89
MgO	0,57
TiO₂	0,26
ostatní	35,49

Tab. 14 Složení použitého vápence

Materiál	vápenec
Frakce (mm)	0.71-1
Střední velikost částic (mm)	0.855
Sypná hmotnost (g/l)	700
Zdánlivá hustota-Hg (g/l)	1084
Skutečná hustota-He (g/l)	2853
Mezerovitost vrstvy (%)	0.35

Tab. 15 Fyzikální vlastnosti použitého vápence

4.2 Návrh experimentu

Návrh experimentu si klade za cíl početně vyjádřit proces spalování v experimentálním zařízení při zvolených podmínkách a teoreticky zhodnotit jevy, které se dějí během spalování čistírenského kalu v experimentálním zařízení pro fluidní spalování.

Jako vstupní parametry byly voleny veličiny: doba experimentu, množství dávkovaného kalu, množství dopravního dusíku, množství spalovaného vzduchu a také přebytek spalovaného vzduchu $\lambda=1,3$ (Vstupní hodnoty pro výpočet byly voleny na základě zkušeností obsluhy experimentálního zařízení a také experimentů provedených před samotnými "ostrými" zkouškami spalování)

V podkapitolách návrhu experimentu je zpracován stechiometrický model spalování pro spalování čistírenského kalu v experimentálním zařízení a výpočet mezní rychlosti fluidizace s tlakovou ztrátou fluidní vrstvy pro jednotlivé sypké hmoty, které se vyskytnou ve spalovací komoře.

Matematické modely výpočtu byly zpracovány v programu Microsoft Office Excel 2003 a jsou k dispozici v přílohách práce.

4.2.1 Stechiometrický výpočet spalování čistírenského kalu pro podmínky experimentu

Složka	Molární hmotnost MW [kg/kmol]	Objemová koncentrace SV	Hmotnostní koncentrace SV	Objemová koncentrace VV x	Hmotnostní koncentrace VV
N ₂	28.0134	0.78084	0.7551	0.76906763	0.74804158
O ₂	31.9988	0.20946	0.2316	0.20650509	0.22943508
Ar	39.948	0.00934	0.0128	0.00914199	0.01268035
CO ₂	44.0095	0.00033	0.0005	0.00032415	0.00049533
Ne	20.1797	0.00001818	0.00001212	1.7136E-05	1.2007E-05
H ₂ O	18.01528	0	0	0.014944	0.00934767

Tab. 16 Molární hmotnosti a koncentrace složek suchého a vlhkého vzduchu

Pro výpočet je známo složení čistírenského kalu i spalovaného vzduchu. Během experimentu byl použit nevysušený vzduch tedy i ve výpočtu bylo vzato v úvahu složení vlhkého vzduchu, jehož relativní vlhkost je 65%, teplota 20°C při atmosférickém tlaku.

Pro výpočet byly použity parametry vzduchu z tabulky 15. Na úvod celého návrhu byla spočítána stechiometrická spotřeba kyslíku O_{stech} , která udává kolik kilomolů kyslíku je potřeba pro spálení 1 kg paliva.[13]

$$O_{\text{stech}} = \left(\frac{c}{MW_C} + \frac{1h}{2MW_{H_2}} + \frac{s}{MW_S} - \frac{o}{MW_{O_2}} \right) - \frac{c}{MW_C} \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) \left[\frac{\text{kmol} O_2}{\text{kg}_{\text{paliva}}} \right] \quad (6)$$

Kde c , h , s , o , n , w jsou hmotnostní koncentrace uhlíku, vodíku (H_2), síry, kyslíku (O_2), dusíku a vody v palivu. Součinitel β je poměr uhlíku, který se neúčastní spalování ku celkovému uhlíku v palivu. Pro případ teoretického výpočtu bylo uvažováno, že všechen uhlík se účastní reakce a tudíž $\beta=0$. Součinitel tvorby oxidu uhelnatého α je hmotnost uhlíku ve vzniklém oxidu uhelnatém během spalování ku hmotnosti uhlíku v palivu. Pro základní návrh se volí. Jeho hodnota byla později vyčíslena po změření produkce CO při odlaďování a zkušebním provozu experimentálního zařízení.

Následuje vyčíslení stechiometrické spotřeby vzduchu VZ_{stech} , která udává kolik kmol vzduchu je třeba ke spálení 1 kg paliva.

$$VZ_{\text{stech}} = \frac{O_{\text{stech}}}{x_{O_2}} \left[\frac{\text{kmol}_{\text{vzd}}}{\text{kg}_{\text{paliva}}} \right] \quad (7)$$

Na základě zkušeností obsluhy experimentálního zařízení bylo zvoleno množství dodávaného vzduchu 2,66 m³/s, při teplotě okolí 20 °C. To jest při normálních podmínkách 2,478 m_N³/s (tedy $V=2,478 \text{ m}_N^3/\text{s}$). Aby mohl být zkontrolován navrhovaný přebytek spalovaného vzduchu $\lambda=1,3$ je třeba vyčíslit průtok vzduchu pro $\lambda=1$ a známý hmotnostní tok paliva \dot{m} . Pro návrh je předpokládán tok dávkovaného paliva $\dot{m}=0,679 \text{ kg/h}$.

$$\dot{V}_{\text{stech}} = V \dot{m} \times \dot{m} \times VZ_{\text{stech}} \times 3600 \left[\frac{\text{m}_N^3}{\text{h}} \right] \quad (8)$$

Nyní je možno provést kontrolu navrženého přebytku vzduchu λ :

$$\lambda = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{\text{stech}}} \quad [-] \quad (9)$$

By vypočten přebytek vzduchu $\lambda=1,293$. Po porovnání s navrhovaným přebytkem vzduchu λ byl vyvozen závěr, že navržený průtok vzduchu je správný.

Dále byla zpracována stechiometrická tvorba spalin vztažená na 1kg dávkovaného kalu. Složky vznikající z paliva jako: stechiometrická tvorba oxidu uhličitého (CO_2) n_{CO_2} , Stechiometrická tvorba oxidu uhelnatého (CO) n_{CO} , Stechiometrická tvorba vody (H_2O) z reakce vodíku obsaženého v palivu n_{H_2O} ,

Stechiometrická tvorba oxidu siřičitého (SO_2) n_{SO_2} , Stechiometrická tvorba dusíku (N_2) n_{N_2} , jsou získány s pomocí vzorců [13].

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{c}{MW_C} \times (1 - \alpha - \beta) \left[\frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{\text{paliva}}} \right] \quad (10)$$

$$n_{\text{CO}} = \frac{c}{MW_C} \times \alpha \left[\frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{\text{paliva}}} \right] \quad (11)$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{h}{MW_{\text{H}_2}} \left[\frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{\text{paliva}}} \right] \quad (12)$$

$$n_{\text{SO}_2} = \frac{s}{MW_S} \left[\frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{\text{paliva}}} \right] \quad (13)$$

$$n_{\text{N}_2} = \frac{n}{MW_{\text{N}_2}} \left[\frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{\text{paliva}}} \right] \quad (14)$$

Stechiometrická tvorba dusíku (N_2) ze spalovaného vzduchu vztážená na 1 kg dávkovaného paliva $n_{\text{N}_2, \text{vz}}$:

$$n_{\text{N}_2, \text{vz}} = \frac{\dot{V} \times x_{\text{N}_2}}{\dot{m} \times Vm} \left[\frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{\text{paliva}}} \right] \quad (15)$$

Stechiometrická tvorba dusíku (N_2) vznikající z transportního dusíku vztážená na 1 kg paliva $n_{\text{N}_2, \text{tr}}$:

$$n_{\text{N}_2, \text{tr}} = \frac{\dot{N}}{\dot{m} \times Vm} \left[\frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{\text{paliva}}} \right] \quad (16)$$

Stechiometrická tvorba vody (H_2O) vznikající z vody obsažené v palivu $n_{\text{H}_2\text{O}, \text{pal}}$

$$n_{\text{H}_2\text{O}, \text{pal}} = \frac{w}{MW_{\text{H}_2\text{O}}} \left[\frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{\text{paliva}}} \right] \quad (17)$$

Stechiometrická tvorba vody (H_2O) z vody obsažené ve spalovaném vzduchu $n_{\text{H}_2\text{O}, \text{vz}}$:

$$n_{H_2O,vz} = \frac{\dot{V} \times x_{H_2O}}{m \times Vm} \left[\frac{kmol}{kg_{paliva}} \right] \quad (18)$$

Stechiometrická tvorba kyslíku (O_2) z přebytku vzduchu n_{O_2} :

$$n_{O_2} = (\lambda - 1) \times O_{stech} \left[\frac{kmol}{kg_{paliva}} \right] \quad (19)$$

Z výše zmíněných výpočtů vyplývá, že stochiometrická tvorba vody a dusíku v experimentu se skládá z více částí. Proto celková stochiometrická tvorba vody ve spalínách $n_{H_2O,celk}$ je rovna součtu dílčích složek:

$$n_{H_2O,celk} = n_{H_2O} + n_{H_2O,vz} + n_{H_2O,pal} \left[\frac{kmol}{kg_{paliva}} \right] \quad (20)$$

Celková stochiometrická tvorba dusíku ve spalínách $n_{N_2,celk}$:

$$n_{N_2,celk} = n_{N_2} + n_{N_2,tr} + n_{N_2,vz} \left[\frac{kmol}{kg_{paliva}} \right] \quad (21)$$

Celková stochiometrická tvorba spalín n_{celk} v experimentu rovna součtu všech složek:

$$n_{celk} = n_{N_2,celk} + n_{H_2O,celk} + n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{CO} + n_{SO_2} \left[\frac{kmol}{kg_{paliva}} \right] \quad (22)$$

Celková stochiometrická tvorba suchých spalín $n_{celk,such}$ je rovna součtu všech složek, kromě celkové stochiometrické tvorby vody:

$$n_{celk,such} = n_{N_2,celk} + n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{CO} + n_{SO_2} \left[\frac{kmol}{kg_{paliva}} \right] \quad (23)$$

Koncentrace jednotlivých složek v suchých spalínách y_i , kde i je požadovaná složka spalín (O_2 , SO_2 , CO , CO_2 , N_2) je dána vztahem:

$$y_i = \frac{n_i}{n_{celk,such}} \quad [-] \quad (24)$$

4.2.2 Výpočet prahových rychlostí fluidizace

Prahová rychlost fluidizace je mezní rychlost při níž vrstva ztrácí nehybný charakter. Jako vstupní veličiny pro výpočet je třeba znát hustotu tuhé látky ρ_t [kg/m³], teplotu pro provoz v navrhovaných podmínkách T [K] (Pro ověřování výpočtu byla zvolena teplota okolí 20 °C), mezerovitost fluidní vrstvy ε , ekvivalentní průměr částice d_p [m]. Pro výpočet byly použity následující hodnoty uvedené v tabulce 17.

	ρ_t [kg/m ³]	ε [-]	d_p [m]
písek	2530	0.43	0.000605
kal	1740	0.45	0.0011398
popel	632	0.48	0.0011398

Tab. 17 Vstupní hodnoty pro výpočet

Další vstupní veličinou pro samotný výpočet prahové rychlosti fluidizace je hustota proudícího média ρ_k . Pro případ návrhu je uvažováno zjednodušení, tedy za proudící médium je vzduch. Důvodem je pozdější snadné porovnání s experimentálně zjištěnými daty. Jako funkční tlak je uvažovaný tlak atmosferický.

$$\rho_k = \frac{MW_{vz} \times p}{R \times T} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (25)$$

Dynamická viskozita proudícího média η [Pa*s] pro vzduch je dána vztahem:

$$\eta = 1,46 \times 10^{-6} \frac{T^{1,504}}{(T - 120)} \quad [Pa \times s] \quad (26)$$

Pro výpočet prahové rychlosti fluidizace u_{mf} byla odvozena rovnice kvadratického typu [15].

$$A \times u_{mf}^2 + B \times u_{mf} + C = 0 \quad (27)$$

Kde koeficienty:

$$A = \frac{1,75 \times \rho_k}{\varepsilon^3 \times d_p} \quad [-] \quad (28)$$

$$B = \frac{150 \times (1 - \varepsilon) \times \eta}{\varepsilon^3 \times d_p^2} \quad [-] \quad (29)$$

$$C = -9,81 \times (\rho_t - \rho_k) \quad [-] \quad (30)$$

Do výpočtu musí být dosazována mezerovitost v okamžiku těsně před tím, než fluidní vrstva začne fluidizovat tzv. prahová mezerovitost. Vzhledem k nedostupnosti hodnot veličiny, orientačnímu charakteru výpočtu, geometricky blíží se tvaru kulové částice a přibližně stejné charakteristice mezerovitostí materiálů bylo rozhodnuto o dosazení prosté mezerovitosti ε .

Ekvivalentní průměr d_p pro písek byl získán jako střední hodnota horní a spodní hodnoty frakce navrhované k použití ve fluidní vrstvě. Pro kal byl získán pomocí váženého průměru vytvořeného ze síťové analýzy. Kde jako hodnoty byly brány střední hodnoty jednotlivých frakcí a jako váhy jejich procentuální zastoupení v celku. Pro popel bylo uvažováno, že nedochází ve fluidní vrstvě k otěru částic a tudíž byl brán stejný ekvivalentní průměr jako pro částice kalu.

Mezní rychlost úletu u_u lze vyjádřit při dosazení za $\varepsilon=1$.

Řešením kvadratické rovnice dostaneme kladný a záporný kořen rovnice. Kladný kořen rovnice je hledaná rychlost u_{mf} případně u_u .

Při návrhu byly zpracovány výpočty tlakové ztráty vrstvy Δp [15].

$$\Delta p = h_{FV} \times \rho_k \times 9,81 + \Delta p_{ppr} \quad [Pa] \quad (31)$$

Kde Δp_{ppr} je tlaková ztráta porézní přepážky, tedy fluidní vrstvy [15].

$$\Delta p_{ppr} = h \times 9,81 \times (1 - \varepsilon) \times (\rho_t - \rho_k) \quad [Pa] \quad (32)$$

4.2.3 Ověření navržených experimentálních podmínek spalování

Pro kontrolu navržených podmínek spalování čistírenského kalu byl uskutečněn předběžný kontrolní experiment. V předběžném experimentu byl použit čistírenský kal č. 1 (Tab.12) Pro experiment byly navrženy následující parametry:

Množství dávkovaného kalu:	679	g/h
Průtok dodávaného vzduchu(101325 Pa, 20 °C):	2.66	m3/h
Průtok dopravního dusíku (101325 Pa, 20 °C):	1	m3/h
Požadovaný přebytek vzduchu λ :	1.3	-

Tab. 18 Vstupní hodnoty pro předběžný experiment

Výsledné vypočítané hodnoty koncentrací jednotlivých složek pro vstupní hodnoty uvedené v tabulce 18 jsou k dispozici v tabulce č. 19.

Složka	Koncentrace such. spalin obj. [0-1]	Koncentrace vlhk. Spalin obj. [0-1]
CO ₂	0.10025285	0.089779319
CO	0.000255429	0.000228744
SO ₂	0.00107606	0.000963642
N ₂	0.86338199	0.773183475
H ₂ O	0	0.104471157
O ₂	0.035033672	0.031373664
Σ	1	1

Tab. 19 Teoretická koncentrace složek ve spalinách

Během předběžného experimentu byly kontinuálně zaznamenávány hodnoty vybraných složek spalin (O₂, CO, CO₂). Naměřená data byla následně zpracována pro platnou dobu experimentu, ve které nemám vliv na naměřená data nájezd a dojezd celého experimentálního zařízení. Byl stanoven aritmetický průměr koncentrace naměřených složek spalin. Průměrné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 19.

Naměřené hodnoty byly porovnány s hodnotami matematicky vyjádřenými a byly vyčísleny procentuální odchylky hodnot vypočítaných a hodnot naměřených. Naměřená koncentrace O₂ se liší od vypočítané hodnoty o 13,8 %. CO₂ se liší o 13,0 % a CO se liší o 0 %.

Shoda vypočítané a naměřené hodnoty u CO je dána dodatečnou úpravou koeficientu α pro výpočet. Jelikož se ostatní hodnoty drasticky neliší je možno považovat navržený model pro spalování za správný. Pro další experimenty bude lepší spalovat méně paliva, aby došlo ke zvýšení přebytku O₂.

složka	Koncentrace such. spalin obj. [0-1]
O ₂	0.0406
CO ₂	0.115
CO	0.000255

Tab. 20 Naměřená koncentrace složek suchých spalin

4.2.4 Ověření navržených experimentálních podmínek fluidizace

V rámci návrhu experimentu byl uskutečněn experiment pro ověření navržených podmínek fluidizace.

Pro experiment bylo použito zařízení, které simuluje proudění ve fluidní vrstvě. Zařízení se skládá z válcového reaktoru, jenž je opatřen perforovaným

roštem. Na rošt je umístěn zkoušený materiál. Ze spodní strany roštu je do zařízení vháněn vzduch o známém průtoku, jenž uvádí celou fluidní vrstvu do pohybu. K zařízení je též napojena U-trubice sloužící k měření tlakové ztráty fluidní vrstvy.

Proces hledání mezní rychlosti fluidizace probíhá následovně. Průtokoměrem je dávkován vzduch do zařízení. Dávkování probíhá od nejnižších hodnot k hodnotám vyšším. Současně je zaznamenávána tlaková ztráta fluidní vrstvy pro jednotlivé průtoky vháněného vzduchu. V okamžiku, kdy začne fluidní vrstva "probublávat" se tlaková ztráta fluidní vrstvy se zvyšujícím se průtokem dále nezvyšuje a zůstává konstantní. Tuto hranici lze označit za hranici fluidizace. Tedy rychlost proudění vzduchu v experimentálním zařízení v tomto zlomu je možno považovat za prahovou rychlost fluidizace u_{mf} .

V experimentu byly primárně zjištěny prahové rychlosti fluidizace pro písek, kal a popel. Dále byly zjištěny mezní rychlosti fluidizace pro kalcinovaný a nekalcinovaný vápenec.

V experimentu byly použity jednotlivé frakce navrhované pro použití v experimentu fluidního spalování :

- písek 0,5 – 0,71 mm
- kal 0,5 – 2,00 mm
- popel 0,63 – 2,00 mm
- vápenec 0,71 – 2,00 mm
- kalcinovaný vápenec 0,71 – 2,00 mm



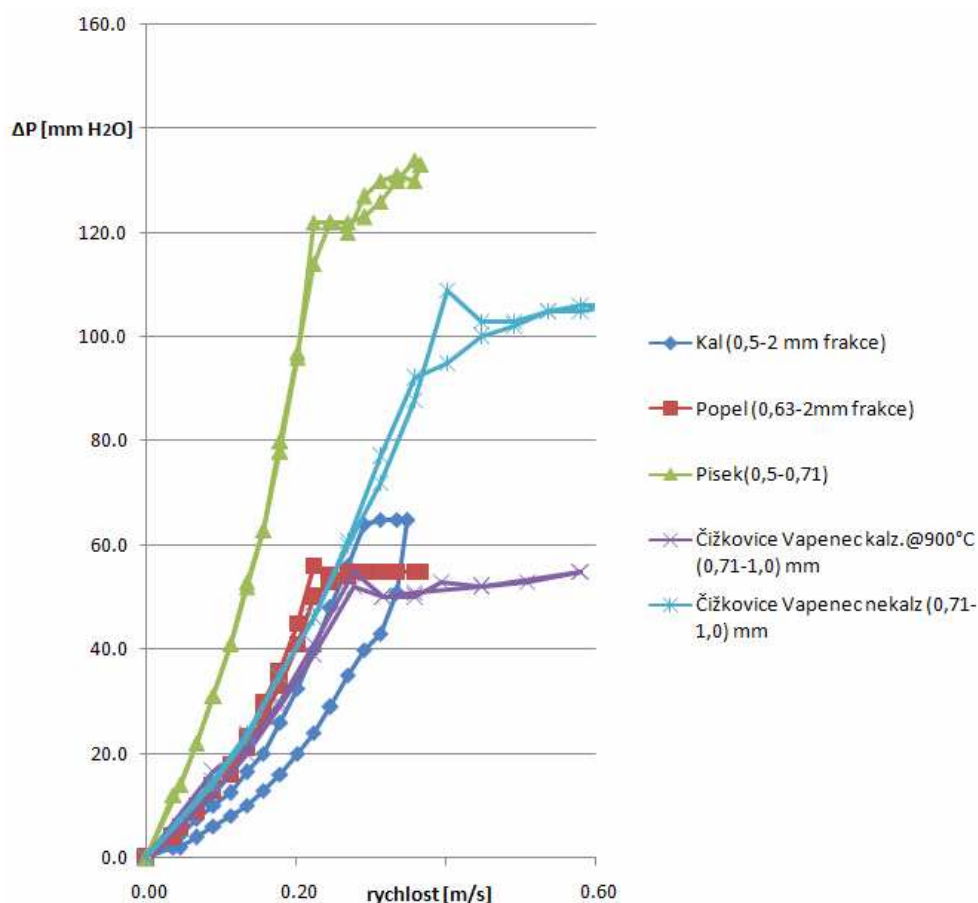
Obr. 16 Experimentální fluidizační zařízení

Byly sestaveny křivky závislosti tlakové ztráty fluidní vrstvy na rychlosti proudění ve válci experimentálního zařízení. Křivky závislosti jsou vyobrazeny v grafu č. 1. V místech zlomu křivek byly určeny prahové rychlosti fluidizace.

Porovnání experimentálně zjištěných a početně navržených prahových rychlostí fluidizace a tlakových ztrát vrstvy je k dispozici v tabulce 21.

Při porovnání hodnot vypočítaných a hodnot experimentálně zjištěných byl vyvozen závěr, že matematický model použitý pro modelování podmínek v experimentu není dostatečně přesný na rozdíl od experimentálně zjištěných dat.

Hodnoty prahových rychlostí fluidizace experimentálně zjištěné stoupají pro jednotlivé materiály v následujícím pořadí. Popel, písek, kal. Matematicky zjištěné hodnoty prahových rychlostí fluidizace stoupají v pořadí následujícím. Písek popel kal. Lze uvažovat, kdyby byl v modelu výpočtu prahové rychlosti fluidizace pro popel uvažován otěr jednotlivých částic o sebe ve fluidní vrstvě, čímž by došlo ke snížení ekvivalentního průměru částic došlo by i ke změně prahové rychlosti fluidizace a posunu pořadí jednotlivých rychlostí tak jak bylo zjištěno v experimentu tedy od nejmenší hodnoty k největší, tedy popel písek kal.



Graf. 1 Závislost tlakové ztráty fluidní vrstvy na rychlosti proudění

	Písek		Kal		Popel	
	vypočteno	experiment	vypočteno	experiment	vypočteno	experiment
Prahová rychlost fluidizace u_{mf} [m/s]	0.359	0.25	0.657	0.29	0.381	0.22
Prahová rychlost uletu u_u [m/s]	2.667	-	3.036	-	1.829	-
Tlaková ztráta vrstvy Δp [Pa]	1153.801	1196.82	765.839	627.84	263.308	549.36

Tab. 21 Naměřené a vypočítané hodnoty prahových rychlostí fluidizace

Pro experiment je důležité, že nejvyšší hodnota prahové rychlosti fluidizace je u čistého kalu a hodnoty pro písek a popel jsou nižší a relativně blízko u sebe. Byl vyvozen předpoklad, že nevyhořelý kal nebude mít tendenci ulétávat z prostoru fluidní vrstvy a přepadávat do zásobníku na popel. Naopak bude mít tendenci se ve fluidní vrstvě zdržet delší dobu, až do okamžiku, kdy palivo vyhoří a vznikne z něho popel, a tudíž se změní jeho vlastnosti. Z grafu č. 1 dále vyplývá, že hodnota mezní rychlostí fluidizace pro nekalcinovaný vápenec je ze složek fluidní vrstvy největší po kalcinaci ve fluidní vrstvě se mezní rychlost fluidizace snižuje směrem k ostatním látkám a vápenec nemá tendenci se dále zdržovat ve fluidní vrstvě. Složky ve fluidní vrstvě by měly být dobře promíchány a konstantně opouštět fluidní vrstvu do přepadu.

Pro kontrolu navržených podmínek byl uskutečněn předběžný kontrolní experiment spalování kalu s vápencem. Kvalita odchodu složek fluidní vrstvy byla zhodnocena na složení odpadu spalování z přepadu fluidní vrstvy. Toto složení je k dispozici na obrázku č. 17.



Obr. 17 Obsah přepadu fluidní vrstvy

V levé spodní části obrázku je patrný písek z fluidní vrstvy použitý k najetí celého zařízení. Po spuštění dávkování se písek z fluidní vrstvy postupně vytratil a zůstal kalcinovaný vápenec a popel. Z obrázku je patrné konstantní rozvrstvení vápence a popela. Při bližším přezkoumání nebyly nalezeny v přepadu žádné známky nevyhořelého kalu. Závěrem předběžného experimentu je, že navržené podmínky pro fluidní vrstvu jsou správné a je možno uskutečnit samotný ostrý experiment.

4.3 Postup experimentů

Jsou-li pominuty zkušební experimenty, tak samotný ostrý experiment se skládá z více dílčích menších experimentů. Charakteristika a podmínky dílčích experimentů jsou znázorněny v tabulce 22. Parametry pro průtok vzduchu a průtok transportního dusíku byly použity pro všechny experimenty shodné, tedy 2,66 m³/h průtok vzduchu a 1 m³/h průtok transportního dusíku při podmínkách okolí. Pro experimenty s přidavkem vápence byl použit shodný vápenec, jehož složení je uvedeno v tabulce 14.

	Experiment			
Číslo dílčího experimentu/měření	1	2	3	4
Délka experimentu	7 hodin 28 minut	7 hodin 52 minut	1 hodina 30 minut	1 hodina 30 minut
Charakteristika	kal/kal	kal/vápenec	kal/kal	kal/vápenec
Průměr komůrek dávkovací destičky [mm]	12/12	13.75/4.00	13,75/0	13.75/4.00
Množství dávkovaného kalu [g/h]	546.7	575.3	501,3	501.3
Množství dávkovaného vápence [g/h]	-	116.3	-	66.6
Vyhodnocené složky spalin	POPs, HF, HCl, TK, TZL, NO ₂ , CO, CO ₂ , O ₂	POPs, HF, HCl, TK, TZL, NO ₂ , CO, CO ₂ , O ₂	SO ₂ , NO ₂ , CO, CO ₂ , O ₂	SO ₂ , NO ₂ , CO, CO ₂ , O ₂

Tab. 22 Charakteristiky jednotlivých experimentů

Pro experiment 1 byl použit čistírenský kal 1, v experimentu 2 byl použit čistírenský kal 2. Pro experimenty 3 a 4 byla použita směs kalů 1 a 2 v poměru 50% kalu číslo 1 a 50% kalu 2.

V experimentech 2 a 4, tedy experimentech spalování s vápencem je patrný rozdíl mezi množstvím dávkovaného kalu a zvláště mezi množstvím dávkovaného vápence, přičemž průměr komůrek dávkování je stejný. Tento rozdíl je způsoben opotřebením dávkovacích komůrek. V experimentu 2 byla použita destička, která byla použita v předcházejícím kontrolním návrhovém experimentu, jelikož se jednalo o dlouhý experiment, bylo délkou experimentu opotřebení umocněno, což mělo za následek vyšší hodnoty dávkování. V experimentu 4 byla použita destička nová.

Z tohoto důvodu byly v experimentech 2 a 4 rozdílné stechiometrické poměry Ca/S. Pro experiment 2 je poměr vápníku a síry 7,3, kdežto pro experiment 4 je poměr vápníku a síry 4,4.

Oproti návrhovému experimentu bylo v experimentech přistoupeno ke snížení množství dávkovaného paliva, aby došlo ke zvýšení přebytku O_2 ve spalínách, kde cílem bylo se co nejvíce přiblížit spalování s přebytkem 6% a víc.

Samotný experiment začíná náběhem celého zařízení. To spočívá v rozehrání topných těles v okolí fluidní vrstvy, za neustálého dávkování vzduchu, který je přehříván na teplotu cca 400 °C. Ten uvádí do pohybu pískovou fluidní vrstvu. Až došlo k ustálení teploty fluidní vrstvy na teplotě 850-870 °C bylo teprve spuštěno dávkování paliva pomocí transportního dusíku. Po nezbytném vyčkání na ustálení teplotních podmínek ve fluidní vrstvě teprve přišlo na řadu vlastní kontinuální měření a odběry vzorků. Dojezd zařízení spočívá ve vypnutí dávkování paliva a regulačních topných těles. Po částečném ochlazení zařízení je vypnuto i dávkování vzduchu.

4.3.1 Příprava složek fluidní vrstvy pro experiment

Nedílnou součástí každého experimentu byla příprava paliva a dalších složek fluidní vrstvy, tedy vápence a písku.

Samotný kal byl po vysušení podroben sítové analýze a poté vysítován na požadovaný rozměr frakcí tedy od 0,5 mm do 2 mm. Tento rozměr byl navržen vzhledem k omezené velikosti experimentálního spalovacího zařízení z důvodu funkčnosti experimentu. Dále byl zohledňován při návrhu experimentu. Ze sítové analýzy vyplývá, že zvolená frakce je běžně zastoupena v kalu.

Rozměr frakce [mm]	Zastoupení [%]
0-0.5	19.78
0.5-1	11.03
1-2	21.41
2-4	24.37
4-6.3	12.14
>6.3	11.26

Tab. 23 Sítová analýza čistírenského kalu č. 1

Před experimentem byly vysítovány také požadované frakce písku a vápence. Tedy 0,5-0,71 mm pro písek a 0,71-1 mm pro vápenec.

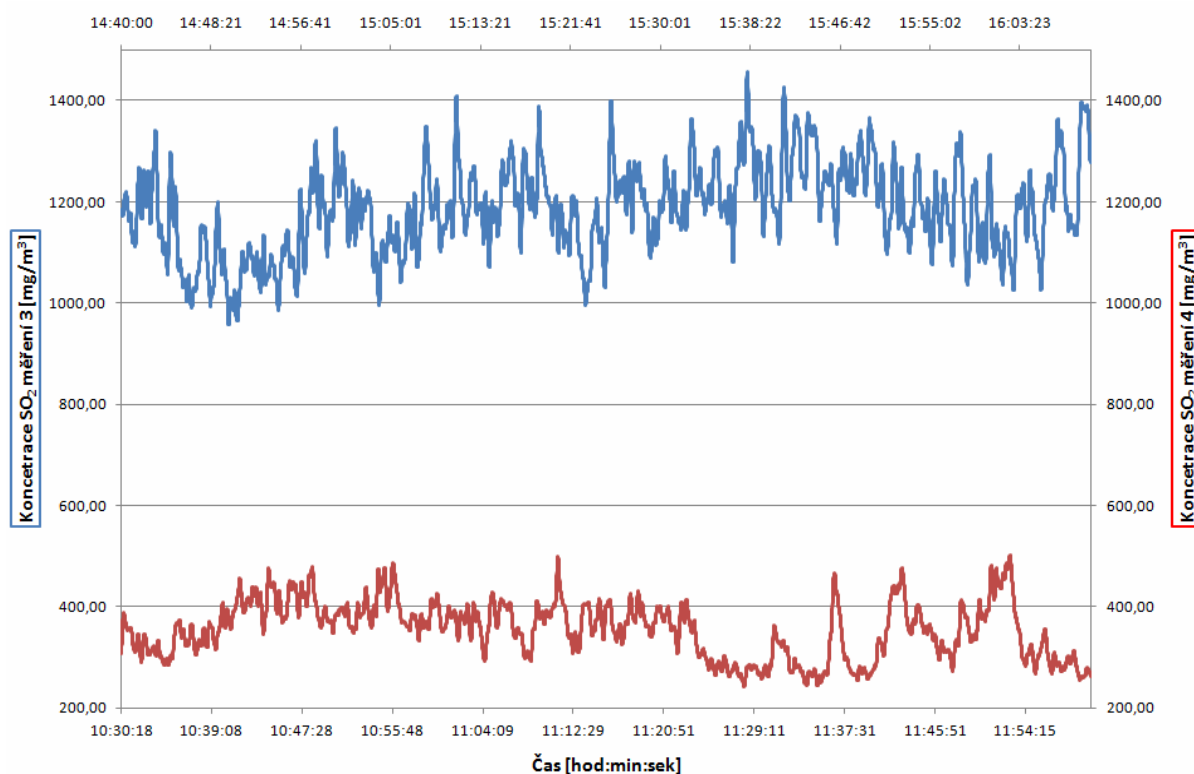
Před samotnými experimenty byly vzorky kalu homogenizovány pomocí tzv. “kyblíkové metody” za účelem distribuce konstantního složení kalu do fluidní vrstvy.

4.4 Výsledky experimentu

Naměřené a vyhodnocené data z experimentů jedna až čtyři jsou shrnuty v následujících podkapitolách.

4.4.1 Vyhodnocení obsahu SO₂ ve spalínách

Obsah (SO₂) ve spalínách byl vyhodnocován v krátkých experimentech 3 a 4. Byla provedena manuální odběrová metoda, tak i kontinuální záznam tvorby spalín. Výsledky z kontinuálního záznamu pro platnou dobu měření byly zpracovány do grafu 2.



Graf 2. Koncentrace SO₂ v suchých spalínách

Z grafu je jasně patrný pokles tvorby SO₂ při experimentu 4, kde byl dávkován kal i vápenec. Z hodnot kontinuálního záznamu byl zpracován aritmetický průměr. Přičemž průměrná tvorba SO₂ v experimentu 3 byla 1185,5 mg/m³ a experimentu 4 byla 354,5 mg/m³. Použitím vápence jako aditiva bylo dosaženo snížení produkce spalín SO₂ v experimentu 4 o 70,1%. Přičemž přebytek O₂ byl během obou experimentů větší jak 6 % i s vlivem pneumotransportu.

Výsledky manuální odběrové metody jsou zpracovány v tabulce 24. Byl proveden vždy jeden odběr pro každý experiment. Pro experimenty 3 a 4 je

zaznamenané snížení tvorby SO₂ ve spalínách o 52,18 % u manuální odběrové metody.

Č. měření	3	4
Při měřeném O ₂ bez pneumotranspotu [mg/m ³]	1192	570
Měřený O ₂ bez pneumotransportu [obj. %]	9,59	8,90
Vztaženo na 6obj. % O ₂ [mg/m ³]	1567	707
Vztaženo na 11 obj. % O ₂ [mg/m ³]	1045	471
Emisní faktor na suché palivo [mg/kg]	6245	2985

Tab. 24 Koncentrace SO₂ v suchých spalínách (0°C, 101325 Pa)

4.4.2 Vyhodnocení obsahu těžkých kovů ve spalínách

Vyhodnocení obsahu těžkých kovů bylo provedeno pro experimenty číslo 1 a 2. Byla provedena manuální odběrová metoda. Přičemž v každém dílčím experimentu byly provedeny vždy tři manuální odběry.

Hmotnostní koncentrace složek těžkých kovů z jednotlivých měření byly zpracovány do tabulek číslo. 25 a 26.

Číslo odběru	1 (μg/m ³)	2 (μg/m ³)	3 (μg/m ³)	Průměr (μg/m ³)
As	32,7	33,5	31,9	32,7
Cd	4,48	4,55	6,00	5,01
Co	7,89	7,70	9,40	8,33
Cu	891	1442	1979	1437
Mn	70,2	146	173	130
Pb	50,1	80,6	85,1	72,0
Sb	30,9	106	35,1	57,3
Sn	68,7	435	45,3	183
V	30,9	31,9	29,6	30,8
Zn	3771	2529	4254	3518

Tab. 25 Hmotnostní koncentrace těžkých kovů v suchých spalínách (0°C, 101325 Pa) vytaženo na 11 obj. % O₂, experiment č. 1

Číslo odběru	1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Průměr ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
As	28,5	29,5	28,7	28,9
Cd	5,58	3,62	3,57	4,26
Co	7,33	6,59	6,45	6,79
Cu	1948	806	1363	1372
Mn	98,0	148	110	119
Pb	86,5	43,6	66,0	65,4
Sb	28,0	26,8	27,4	27,4
Sn	31,8	27,8	29,6	29,7
V	28,0	26,8	28,9	27,9
Zn	2787	4612	2291	3230

Tab. 26 Hmotnostní koncentrace těžkých kovů v suchých spalínách (0°C, 101325 Pa) vytaženo na 11 obj. % O₂, experiment č. 2

Blížeším přezkoumáním byl vyvozen závěr, že podle očekávání má přidavek vápence do spalovacího procesu lehký vliv na snížení koncentracie těžkých kovů ve spalínách.

Jednotlivé odchylky jsou způsobeny nestejnorodostí dávkovaných kalů číslo 1 a 2, nekonstantním dávkováním, případně odchylkou přesnosti metody stanovení.

4.4.3 Vyhodnocení obsahu fluoru ve spalínách

Měření obsahu fluoru ve spalínách se vyskytujícího jako fluorovodík (HF) bylo provedeno v rámci experimentů 1 a 2. Ke stanovení koncentrací byla využita manuální odběrová metoda, přičemž pro každé měření byly uskutečněny 3 odběry.

Koncentrace fluoru byla stanovena bez vlivu dusíku pneumotransportu na složení spalin pro suché spaliny. V experimentu 1 byl průměrný přebytek kyslíku O₂ roven 8,6 % bez vlivu transportního dusíku a v experimentu 2 byla průměrná hodnota přebytku O₂ bez vlivu transportního dusíku rovna 7,21 %.

Porovnání naměřených hodnot z experimentů 1 a 2 je k dispozici v tabulkách č. 27 a 28. Příměsí vápence jako aditiva pro spalování do spalovacího procesu ve fluidní vrstvě bylo dosaženo snížení obsahu fluoru v suchých spalínách o 48,5 %.

Č. odběru	1	2	3	Průměr
Při měření O ₂ bez pneumotranspotu [mg/m ³]	15,5	20,5	19,6	18,5
Měřený O ₂ bez pneumotranspotu [obj. %]	8,83	8,67	8,29	8,60
Vztaženo na 6 obj. % O ₂ [mg/m ³]	19,0	25,0	23,1	22,4
Vztaženo na 11 obj. % O ₂ [mg/m ³]	12,7	16,7	15,4	14,9
Emisní faktor na suché palivo [mg/kg]	81,2	108	103	97,3

Tab. 27 Hmotnostní koncentrace fluoru v suchých spalínách, experiment č. 1, (0°C, 101325 Pa)

Č. odběru	1	2	3	Průměr
Při měření O ₂ bez pneumotranspotu [mg/m ³]	8,11	10,8	11,3	10,1
Měřený O ₂ bez pneumotranspotu [obj. %]	7,57	7,10	6,96	7,21
Vztaženo na 6 obj. % O ₂ [mg/m ³]	9,06	11,7	12,0	10,9
Vztaženo na 11 obj. % O ₂ [mg/m ³]	6,04	7,80	8,03	7,29
Emisní faktor na suché palivo [mg/kg]	40,3	53,9	56,0	50,1

Tab. 28 Hmotnostní koncentrace fluoru v suchých spalínách experiment č. 2, (0°C, 101325 Pa)

4.4.4 Vyhodnocení obsahu chloru ve spalínách

Měření obsahu chloru ve spalínách se vyskytujícího jako kyselina chlorovodíková (HCl) bylo provedeno v rámci experimentů 1 a 2. Ke stanovení koncentrací byla využita manuální odběrová metoda, přičemž pro každé měření byly uskutečněny 3 odběry.

Koncentrace chloru byla stanovena bez vlivu dusíku pneumotransportu na složení spalin pro suché spaliny. V experimentu 1 byl průměrný přebytek kyslíku O₂ roven 8,6 % bez vlivu transportního dusíku a v experimentu 2 byla průměrná hodnota přebytku O₂ bez vlivu transportního dusíku je rovna 7,21 %.

Porovnání naměřených hodnot z experimentů 1 a 2 je k dispozici v tabulkách 29 a 30. V experimentu 2 (spalování kal+vápenec) byla naměřena vyšší průměrná koncentrace chloru než v experimentu 1. Je to způsobeno hodnotou obsahu chloru v kalu 2, která je vyšší než hodnota obsahu chloru v kalu číslo 1. Vyšší koncentrace chloru v měření č. 2 je také způsobena větším množstvím dávkovaného kalu. Vliv vápence na obsah chloru ve spalínách pro hodnoty naměřené v experimentu je

zdánlivě nulový. Lze však předpokládat, že vápenec na obsah chloru ve spalínách v experimentu měl nepatrný vliv.

Č. odběru	1	2	3	Průměr
Při měření O ₂ bez pneumotranspotu [mg/m ³]	87,5	88,7	76,0	84,1
Měřený O ₂ bez pneumotransportu [obj. %]	8,83	8,67	8,29	8,60
Vztaženo na 6 obj. % O ₂ [mg/m ³]	108	108	89,6	101,8
Vztaženo na 11 obj. % O ₂ [mg/m ³]	71,9	72,0	59,8	67,9
Emisní faktor na suché palivo [mg/kg]	460	466	399	441,8

Tab. 29 Hmotnostní koncentrace chloru v suchých spalínách, experiment č. 1 (0°C, 101325 Pa)

Č. odběru	1	2	3	Průměr
Při měření O ₂ bez pneumotranspotu (mg/m ³)	85,4	90,1	91,5	89,0
Měřený O ₂ bez pneumotransportu (obj. %)	7,57	7,10	6,96	7,21
Vztaženo na 6 obj. % O ₂ (mg/m ³)	95,5	97,3	97,7	96,8
Vztaženo na 11 obj. % O ₂ (mg/m ³)	63,6	64,8	65,2	64,6
Emisní faktor na suché palivo (mg/kg)	425	448	455	443

Tab. 30 Hmotnostní koncentrace chloru v suchých spalínách, experiment č. 2 (0°C, 101325 Pa)

4.4.5 Vyhodnocení obsahu TZL ve spalínách

Obsah tuhých znečišťujících látek (TZL) v suchých spalínách byl stanovován při experimentálních zkouškách č. 1 a 2.

Byly prováděny 3 odběry pro každý dílčí experiment. Tuhé znečišťující látky byly zachytávány na filtr a poté bylo vyhodnocováno množství TZL na filtru zachycených. Pro vyhodnocení byly stanoveny hodnoty koncentrace bez vlivu dusíku pneumotransportu.

Vyhodnocení odběrů tuhých znečišťujících látek je uvedeno v tabulkách číslo 31 a 32. Z tabulek je patrné, že obsah TZL v suchých spalínách je nižší u experimentu č. 2, přestože bylo dávkováno víc paliva a palivo bylo spalováno s nižším přebytkem kyslíku.

Č. odběru	1	2	3	Průměr
Při měřeném O ₂ bez pneumotranspotu [mg/m ³]	96,5	148	199	148
Měřený O ₂ bez pneumotranspotu [obj. %]	8,83	8,67	8,29	8,60
Vztaženo na 6obj. % O ₂ [mg/m ³]	119	180	234	178
Vztaženo na 11 obj. % O ₂ [mg/m ³]	79	120	156	119
Emisní faktor na suché palivo [mg/kg]	507	779	1044	777

Tab. 31 Koncentrace TZL v suchých spalínách (0°C, 101325 Pa), experiment č. 1

Č. odběru	1	2	3	Průměr
Při měřeném O ₂ bez pneumotranspotu [mg/m ³]	97,1	141	173	137
Měřený O ₂ bez pneumotranspotu [obj. %]	7,57	7,10	6,96	7,21
Vztaženo na 6obj. % O ₂ [mg/m ³]	108	153	185	149
Vztaženo na 11 obj. % O ₂ [mg/m ³]	72,3	102	123	99,2
Emisní faktor na suché palivo [mg/kg]	483	703	862	682

Tab. 32 Koncentrace TZL v suchých spalínách (0°C, 101325 Pa), experiment č. 2

4.4.6 Vyhodnocení obsahu PCDD/F ve spalínách

Obsah polychlorovaných dibenzodioxnů (PCDD) a polychlorovaných dibenzofuranů (PCDF) byl stanoven při experimentech 1 a 2. V rámci každého experimentu byl proveden jeden manuální odběr s dobou trvání 6 hodin.

Přebytek kyslíku bez vlivu dusíku pneumotranspotu pro experiment 1 je 8,6 % a pro experiment 2 je 7,21 %.

Naměřená data jsou zpracována v tabulce 33. Z tabulky je patrné, že obsah všech složek v suchých spalínách je pod mezí stanovitelnosti, tudíž se dá předpokládat, že při spalování nevznikalo téměř žádné PCDD/F a není možno posoudit vliv vápence na tvorbu těchto látek.

	experiment č. 1	experiment č. 2
	Koncentrace [ng/m _N ³]	Koncentrace [ng/m _N ³]
2,3,7,8-TCDD	< 0.007	< 0.008
1,2,3,7,8-PeCDD	< 0.009	< 0.009
1,2,3,4,7,8-HxCDD	< 0.010	< 0.011
1,2,3,6,7,8-HxCDD	< 0.010	< 0.011
1,2,3,7,8,9-HxCDD	< 0.010	< 0.011
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	< 0.024	< 0.023
OCDD	< 0.059	< 0.048
2,3,7,8-TCDF	< 0.018	< 0.010
1,2,3,7,8-PeCDF	< 0.013	< 0.011
2,3,4,7,8-PeCDF	< 0.013	< 0.011
1,2,3,4,7,8-HxCDF	< 0.019	< 0.012
1,2,3,6,7,8-HxCDF	< 0.019	< 0.012
1,2,3,7,8,9-HxCDF	< 0.019	< 0.012
2,3,4,6,7,8-HxCDF	< 0.019	< 0.012
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	< 0.023	< 0.022
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	< 0.023	< 0.022
OCDF	< 0.053	< 0.054

< Koncentrace složky pod mezí detekce

Tab. 33 Koncentrace PCDD/F v suchých spalínách

4.4.6 Vyhodnocení obsahu PAU ve spalínách

	experiment č. 1	experiment č. 2
	Koncentrace [ng/m _N ³]	Koncentrace [ng/m _N ³]
Fluoranthene	4539	4565
Pyrene	14150	15038
Benzo[a]anthracene	158	150
Chrysene	264	322
Benzo[b]fluoranthene	262	260
Benzo[k]fluoranthene	123	99
Benzo[a]pyrene 37	99	107
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	166	156
Dibenzo[a,h]anthracene	<53	<54
Benzo[g,h,i]perylene	4539	4834

< Koncentrace složky pod mezí detekce

Tab. 34 Koncentrace PAU v suchých spalínách

Obsah polyaromatických uhlovodíků (PAU) ve spalínách byl měřen v rámci experimentů č. 1 a 2. Pro každý experiment byl proveden manuální odběr, délka odběru byla 6 hodin.

Výsledky odběru jsou uvedeny v tabulce č. 34. Většina složek PAU byla detekována. Po bližším přezkoumání, byl vyvozen závěr, že přídavek vápence jako aditiva v experimentu č. 2 měl minimální vliv na tvorbu složek PAU ve spalínách. Během experimentu č. 2 byly zaznamenány o trochu vyšší hodnoty koncentrace u většiny PAU ve spalínách, to může být způsobeno vyšším množstvím dávkovaného kalu.

4.4.6 Vyhodnocení obsahu PCB ve spalínách

	experiment č. 1	experiment č. 2
	Koncentrace [ng/m _N ³]	Koncentrace [ng/m _N ³]
mono-PCB	48.06	37.6
di-PCB	93.45	56.39
tri-PCB	266.99	177.24
tetra-PCB	197.57	131.58
PCB#77	<0.93	<0.86
PCB#81	<0.09	<0.09
penta-PCB	50.75	69.82
PCB#105	<1.04	<2.39
PCB#114	<0.1	<0.13
PCB#118	<6.41	<6.44
PCB#123	<0.09	<0.13
PCB#126	<0.1	<0.12
hexa-PCB	112.14	145.01
PCB#156	1.98	2.12
PCB#157	<0.37	<0.54
PCB#167	<0.64	1.02
PCB#169	<0.37	<0.32
hepta-PCB	58.74	61.76
PCB#170	7.21	7.25
PCB#180	21.09	21.48
PCB#189	<0.83	<0.81
okta-PCB	<11.75	9.13
nona-PCB	<4.54	<2.95
deka-PCB	<0.15	<0.2

< Koncentrace složky pod mezí detekce

Tab. 35 Koncentrace PCB v suchých spalínách

Obsah polychlorovaných bifenyly (PCB) ve spalínách byl měřen v rámci experimentů č. 1 a 2. Pro každý experiment byl proveden manuální odběr, délka odběru byla 6 hodin.

Výsledky odběru jsou uvedeny v tabulce č. 35. Padesát % složek polychlorovaných bifenyly nebylo ve vzorku detekováno. Po bližším přezkoumání, byl vyvozen závěr, že přídavek vápence jako aditiva v experimentu č. 2 neměl podstatný vliv na tvorbu složek PCB ve spalínách. Během experimentu č. 2 byly

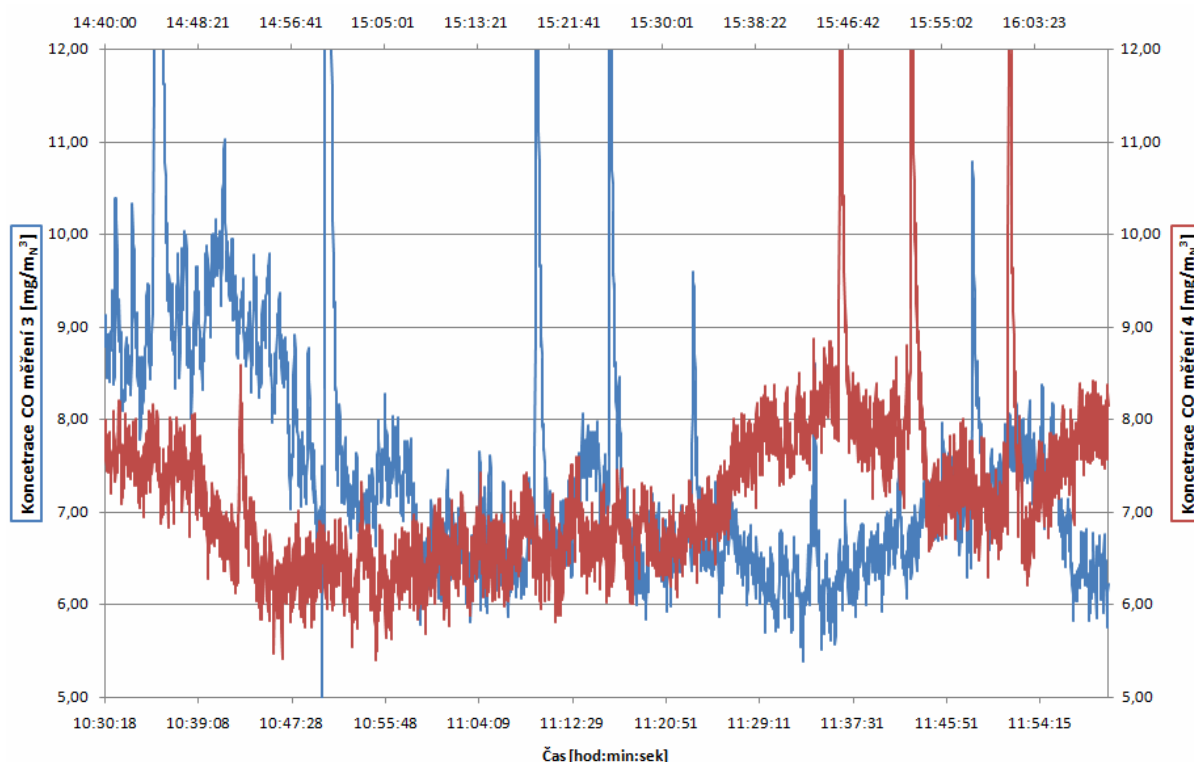
zaznamenány o málo nižší hodnoty koncentrace mono, di, tri, tetra-PCB ve spalínách, naopak u zbylých detekovaných složek byly zaznamenány při experimentu č. 2 hodnoty vyšší.

4.4.7 Vyhodnocení obsahu CO ve spalínách

Hodnoty CO byly zaznamenávány v průběhu experimentů 1, 2, 3 a 4. Byl proveden online záznam koncentrací CO v suchém plynu pomocí analyzátoru plynů.

Naměřený průběh koncentrací CO v experimentech 3 a 4 je k dispozici v grafu 3. V experimentu 1 bylo spalováno palivo s průměrnou teplotou ve fluidní vrstvě 866,8 °C, přičemž průměrná koncentrace v suchých spalínách činila 357,89 ppm. V experimentu 2 byl spalován kal a vápenec při průměrné teplotě ve fluidní vrstvě 868,1 °C, přičemž naměřená průměrná koncentrace CO ve spalínách byla 244,76 ppm. Je patrné snížení průměrného obsahu CO v případě spalování kalu a vápence v experimentu 2, přestože bylo dávkováno více kalu jako v experimentu 1. Naměřené průměrné teploty fluidní vrstvy jsou si velice blízké.

V experimentu 3 byl spalován samotný kal. Průměrná hodnota teploty ve fluidní vrstvě při experimentu 3 byla naměřena 853,4 °C, přičemž průměrná naměřená hodnota koncentrace CO byla 7,59 mg/m³. V experimentu 4 byl spalován kal s příměsí vápence při průměrné teplotě fluidní vrstvy 865,7 °C, průměrná naměřená hodnota koncentrace CO v suchých spalínách byla 7,15 mg/m³.



Graf. 3 Koncentrace CO v suchých spalínách, normální podmínky

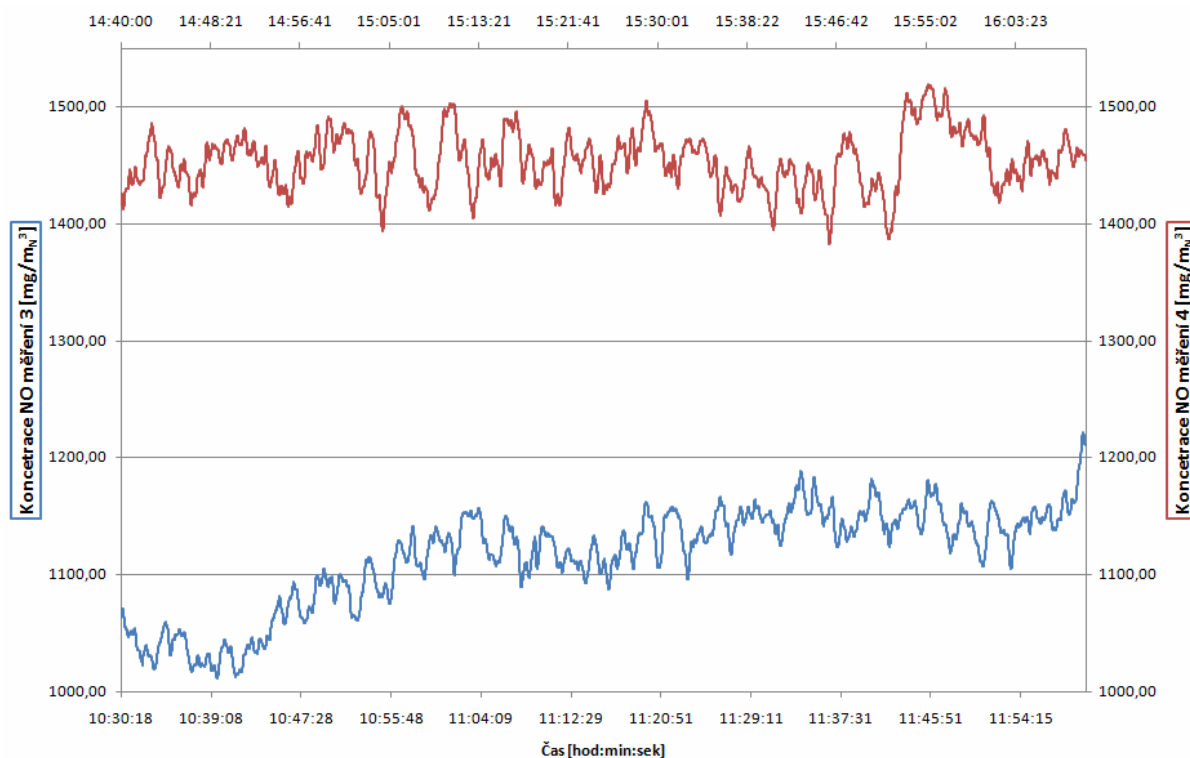
V experimentech se spalováním čistírenského kalu spolu s vápencem byla zaznamenána nižší koncentrace CO než v experimentech ve kterých byl spalován pouze samostatný kal.

4.4.8 Vyhodnocení obsahu NO ve spalinách

Hodnoty NO byly zaznamenávány v průběhu experimentů 1, 2, 3 a 4. Byl proveden online záznam koncentrací NO v suchém plynu pomocí analyzátoru plynů.

Naměřený průběh koncentrací NO v experimentech 3 a 4 je k dispozici v grafu 4. V experimentu 1 bylo spalováno palivo s průměrnou teplotou ve fluidní vrstvě 866,8 °C, přičemž průměrná koncentrace v suchých spalinách činila 811,79 ppm. V experimentu 2 byl spalován kal a vápenec při průměrné teplotě ve fluidní vrstvě 868,1 °C, přičemž naměřená průměrná koncentrace NO ve spalinách byla 838,25 ppm. Je patrné zvýšení průměrného obsahu NO v případě spalování kalu a vápence v experimentu 2. Naměřené průměrné teploty fluidní vrstvy jsou si velice blízké.

V experimentu 3 byl spalován samotný kal. Průměrná hodnota teploty ve fluidní vrstvě při experimentu 3 byla naměřena 853,4 °C, přičemž průměrná naměřená hodnota koncentrace NO byla 1115,87 mg/m³. V experimentu 4 byl spalován kal s příměsí vápence při průměrné teplotě fluidní vrstvy 865,7 °C, průměrná naměřená hodnota koncentrace NO v suchých spalinách byla 1453,56 mg/m³.



Graf. 4 Koncentrace NO v suchých spalinách, normální podmínky

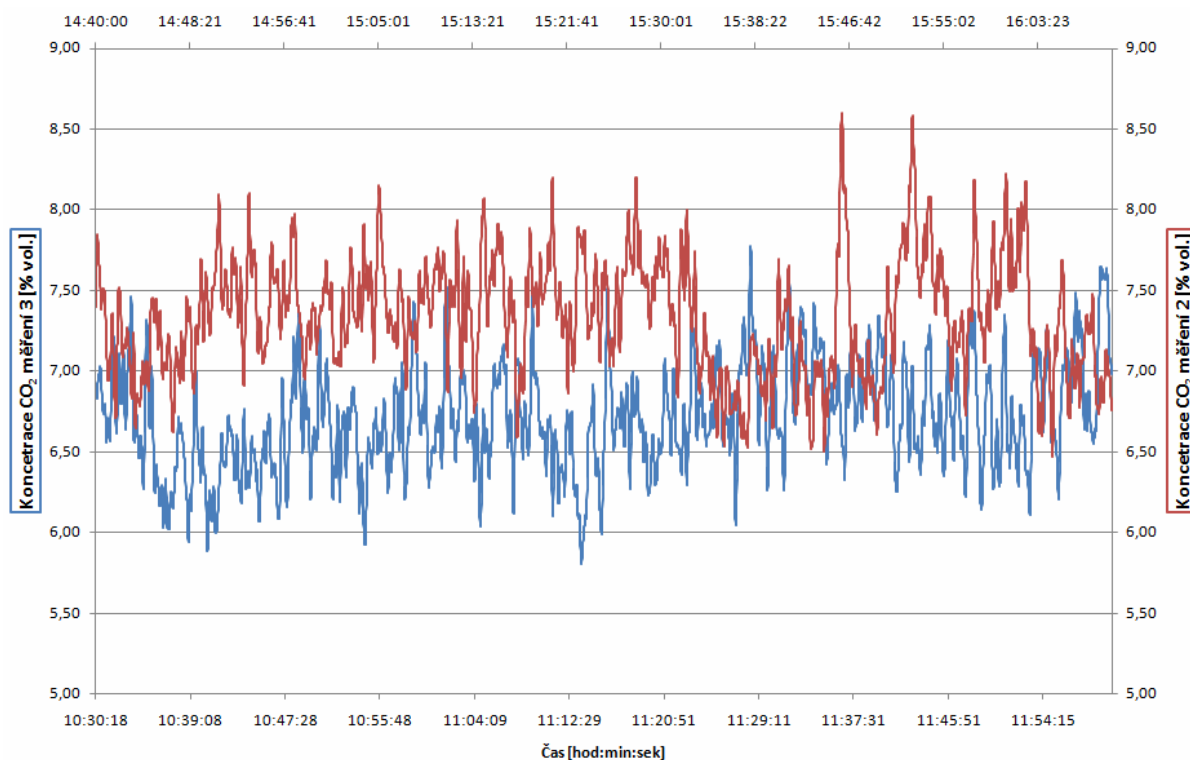
V experimentech se spalováním čistírenského kalu spolu s vápencem byla zaznamenána vyšší koncentrace NO než v experimentech ve kterých byl spalován pouze samostatný kal.

4.4.9 Vyhodnocení obsahu CO₂ ve spalinách

Hodnoty CO₂ byly zaznamenávány v průběhu experimentů 1, 2, 3 a 4. Byl proveden online záznam koncentrací CO₂ v suchém plynu pomocí analyzátoru plynů.

Naměřený průběh koncentrací CO₂ v experimentech 3 a 4 je k dispozici v grafu 5. V experimentu 1 bylo spalováno palivo s průměrnou teplotou ve fluidní vrstvě 866,8 °C, přičemž průměrná koncentrace v suchých spalinách činila 10,17 %. V experimentu 2 byl spalován kal a vápenec při průměrné teplotě ve fluidní vrstvě 868,1 °C, přičemž naměřená průměrná koncentrace CO₂ ve spalinách byla 10,96 %. Je patrné zvýšení průměrného obsahu CO₂ v případě spalování kalu a vápence v experimentu 2. Naměřené průměrné teploty fluidní vrstvy jsou si velice blízké.

V experimentu 3 byl spalován samotný kal. Průměrná hodnota teploty ve fluidní vrstvě při experimentu 3 byla naměřena 853,4 °C, přičemž průměrná naměřená hodnota koncentrace CO₂ byla 6,71 %. V experimentu 4 byl spalován kal s příměsí vápence při průměrné teplotě fluidní vrstvy 865,7 °C, průměrná hodnota koncentrace CO₂ v suchých spalinách byla naměřena 7,34 %.



Graf. 5 Koncentrace CO₂ v suchých spalinách, normální podmínky

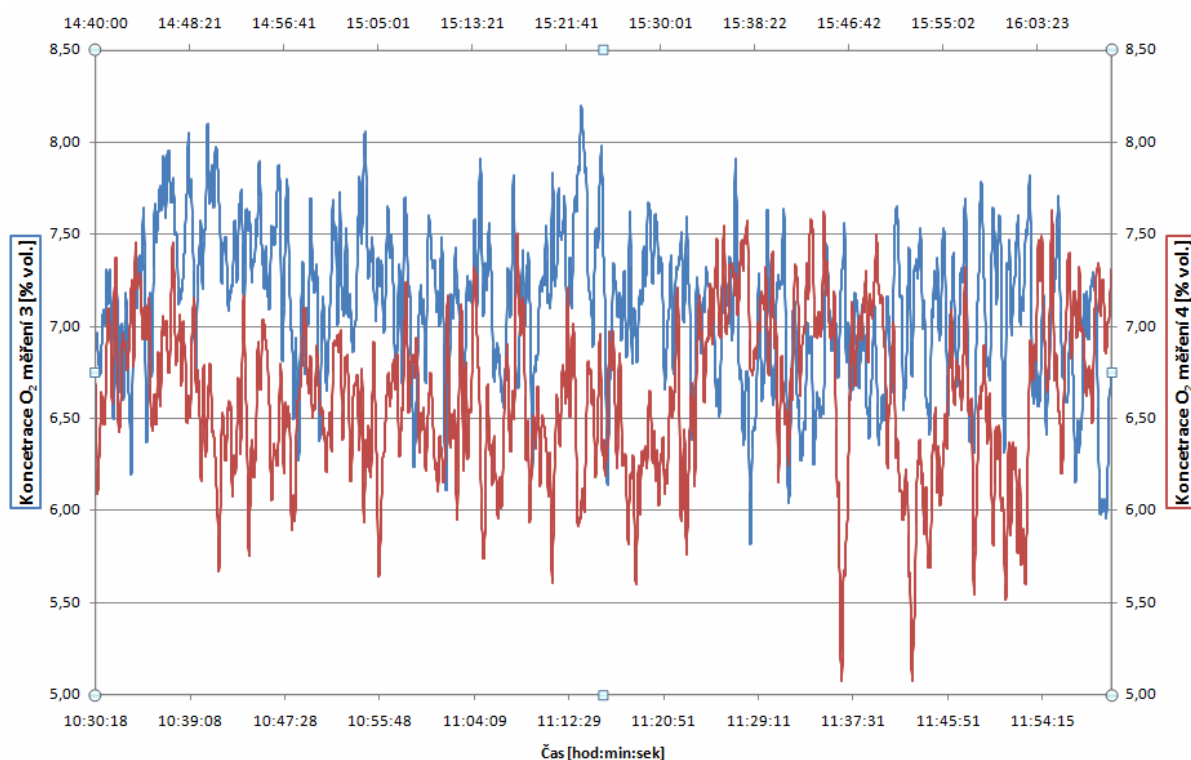
V experimentech se spalováním čistírenského kalu spolu s vápencem byla zaznamenána vyšší koncentrace CO_2 než v experimentech ve kterých byl spalován pouze samostatný kal.

4.4.10 Vyhodnocení obsahu O_2 ve spalinách

Hodnoty O_2 byly zaznamenávány v průběhu experimentů 1, 2, 3 a 4. Byl proveden online záznam koncentrací O_2 v suchém plynu pomocí analyzátoru plynů.

Naměřený průběh koncentrací O_2 v experimentech 3 a 4 je k dispozici v grafu 6. V experimentu 1 bylo spalováno palivo s průměrnou teplotou ve fluidní vrstvě $866,8\text{ }^\circ\text{C}$, přičemž průměrná koncentrace v suchých spalinách činila $6,33\%$. V experimentu 2 byl spalován kal a vápenec při průměrné teplotě ve fluidní vrstvě $868,1\text{ }^\circ\text{C}$, přičemž naměřená průměrná koncentrace O_2 ve spalinách byla $5,26\%$. Je patrné snížení průměrného obsahu O_2 v případě spalování kalu a vápence v experimentu 2. Naměřené průměrné teploty fluidní vrstvy jsou si velice blízké.

V experimentu 3 byl spalován samotný kal. Průměrná hodnota teploty ve fluidní vrstvě při experimentu 3 byla naměřena $853,4\text{ }^\circ\text{C}$, přičemž průměrná naměřená hodnota koncentrace O_2 byla $7,11\%$. V experimentu 4 byl spalován kal s příměsí vápence při průměrné teplotě fluidní vrstvy $865,7\text{ }^\circ\text{C}$, průměrná hodnota koncentrace O_2 v suchých spalinách byla naměřena $6,61\%$.



Graf. 6 Koncentrace O_2 v suchých spalinách, normální podmínky

V experimentech se spalováním čistírenského kalu spolu s vápencem byla zaznamenána nižší koncentrace O_2 než v experimentech ve kterých byl spalován pouze samostatný kal.

5. Závěr

Spalování čistírenských kalů je provázeno množstvím více či méně škodlivých látek vyskytujících se ve spalínách jak v plynné tak i pevné fázi. Množství obsahu těchto látek vypouštěných do ovzduší je předepsáno legislativou, proto je nutno provádět soustavné čištění spalin, aby nedocházelo k porušování předpisů a nařízení.

V rámci této práce byly popsány nejčastěji používané způsoby spalování čistírenských kalů. Byly zmíněny emisní předpisy pro spalování odpadů, přičemž do této skupiny se vztahují i čistírenské kaly. Dále byly zhodnoceny způsoby čištění spalin s ohledem na suchou vápencovou metodu, na niž je zaměřený provedený experiment.

Byl navržen praktický experiment spalování čistírenského kalu ve fluidním reaktoru s příměsí vápence. Navrhovaná a poté spalovaná frakce částic kalu s ohledem na konstrukční omezení vlastního experimentálního zařízení se pohybovala v rozmezí 0,5 až 2 mm. Rozměr frakce vápence dávkovaného během experimentu do prostoru fluidní vrstvy se pohyboval od 0,71 do 1 mm. Před samotným experimentem byly tyto navrhované frakce spolu s pískem připravovány síťováním a podrobeny analýze prahových rychlostí fluidizace za účelem odhadnutí chování jednotlivých frakcí ve fluidní vrstvě. V návrhovém experimentu se ze složení přepadu fluidní vrstvy ukázalo, že návrh rozměrů jednotlivých frakcí byl správný a docházelo ke stejnoměrnému mísení všech složek paliva.

Byl zpracován model spalování čistírenského kalu pro podmínky experimentu. Výsledky modelu byly porovnány s hodnotami zjištěnými během návrhového experimentu. Hodnoty navrhované se nepatrně lišily od hodnot naměřených. Byl též zpracován model výpočtu prahové rychlosti fluidizace. Pro namodelované podmínky se však ukázal jako ne příliš přesný při porovnání s prahovými rychlostmi fluidizace zjištěnými experimentálně.

Samotné ostré měření se uskutečnilo v několika fázích. V práci jsou tyto fáze děleny na 4 úseky charakterizované především složením paliva a délkou experimentu. V experimentu jedna byl samostatně spalován čistírenský kal 1, přičemž délka experimentu byla 7 hodin a 28 minut. V experimentu 2 byl spalován čistírenský kal 2 s příměsí vápence, délka experimentu byla 7 hodin 52 minut, poměr Ca/S byl 7,3. V následujícím experimentu 3 byla spalována směs kalů 1 a 2 v poměru 50% kalu 1 a 50% kalu 2. Délka experimentu 3 byla 1 hodina 30 minut. Závěrečný experiment 4 se vyznačoval spalováním čistírenského kalu se stejnou charakteristikou jako v experimentu 3, přičemž jako aditivum byl dávkován vápenec. Doba experimentu 4 byla 1 hodina 30 minut, poměr Ca/S byl 4,4.

V samostatných experimentech byly prováděny buď kontinuální záznamy jednotlivých složek spalin pomocí analyzátoru plynů, nebo byly uskutečněny

manuální odběry, které pak byly laboratorně vyhodnoceny. Všechna naměřená data byla zpracována a vyhodnocena v kapitole 4.4.

Měřené a vyhodnocované látky ve spalínách prováděných experimentů jsou SO₂, CO, CO₂, NO, O₂, H, F, těžké kovy, PCDD/F, PCB, PAU a TZL.

Vliv vápence na obsah oxidu siřičitého ve spalínách byl hodnocen v rámci experimentů 3 a 4. Z průměrných hodnot naměřených analyzátozem plynu byl zjištěn pokles SO₂ v experimentu 4 o 70,1 %. Z hodnot zjištěných manuální odběrovou byl zaznamenán pokles tvorby SO₂ v experimentu 4 o 52,18 %.

Koncentrace těžkých kovů ve spalínách byla sledována v experimentech 1 a 2. Přestože celkový obsah těžkých kovů naměřený v experimentu 2 je nižší, nedá se předpokládat nějaký výrazný vliv vápence na snižování jejich koncentrace.

Tuhé znečišťující látky byly odebrány během experimentu 1 a 2. Odběr byl prováděn zachycením na filtr. Průměrná hodnota tuhých znečišťujících látek v experimentu 2 byla nižší. Nedá se však předpokládat, že nižší hodnota byla způsobena příměsí vápence při spalování. Nižší hodnota může být způsobena rozdílnou kvalitou síťování kalů 1 a 2.

Pro stanovení PCDD/F byla použita manuální odběrová metoda. Odběry byly prováděny v rámci experimentů 1 a 2. Naměřené hodnoty PCDD/F se u všech složek pohybovali pod mezí stanovitelnosti, nelze tedy vyvodit jasný závěr, jaký má vápenec vliv na tvorbu PCDD/F. Byl-li by předpokládán obsah všech složek PCDD/F na mezi stanovitelnosti, byl by obsah ve spalínách roven 0,03213 ng/m_N³.

V experimentech 1 a 2 byl sledován také obsah fluoru ve spalínách. Manuální odběrovou metodou byla stanovena v experimentu 2 o 48,5 % nižší koncentrace fluoru v suchých spalínách než v experimentu 1. Příklad vápence má tedy příznivý vliv na snižování obsahu fluoru ve spalínách.

Koncentrace chloru byla sledována pro případ experimentu 1 a 2. Z výsledků manuální odběrové metody vyplynulo, že naměřené hodnoty v experimentech 1 a 2 jsou téměř shodné. Ve světle většího množství dávkovaného paliva v experimentu 2 lze však předpokládat, že příměs vápence na snížení obsahu chloru ve spalínách měla kladný vliv.

Obsah PCB ve spalínách byl měřen při experimentech 1 a 2. Z výsledků manuálních odběrů vyplývá, že v experimentu 2 byly naměřeny nižší hodnoty jen u některých složek PCB. Nižší hodnoty byly naměřeny u mono, di, tri, tetra-PCB. U ostatní složky PCB v experimentu 2 byly větší, nebo nebyly detekovány.

Hodnoty obsahu PAU ve spalínách byly odebrány v experimentech 1 a 2. Naměřené hodnoty pomocí manuální odběrové metody. U většiny složek PAU byly v experimentu 2 naměřeny vyšší hodnoty než v experimentu 1. To může být způsobeno větším božstvím dávkovaného kalu v experimentu 2, nelze to však s určitostí říci.

Hodnoty koncentrací CO ve spalínách byly kontinuálně zaznamenávány a následně porovnávány pro experimenty 1, 2 a 3, 4. V obou případech spalování s příměsí vápence byly naměřeny nižší hodnoty koncentrace CO ve spalínách. V experimentu 2 byla naměřená průměrná koncentrace CO nižší o 54,6 % než v experimentu 1. V experimentu 4 byla naměřená průměrná koncentrace CO nižší o pouhých 5,8 %.

Obsah NO ve spalínách byl sledová a vyhodnocen v experimentech 1,2,3 a 4. Byly pořízeny kontinuální záznamy a porovnávány experimenty 1 s experimentem 2 a experiment 3 s experimentem 4. Průměrné naměřené hodnoty v experimentech 2 a 4 byly vyšší než hodnoty naměřené v experimentech 1 a 3. V experimentu 2 byla

naměřená průměrná koncentrace NO vyšší o 6,8 % než v experimentu 1. V experimentu 4 byla naměřená průměrná koncentrace NO vyšší o 30,2 %.

Koncentrace CO₂ byla kontinuálně zaznamenávána v experimentech 1,2 a 3,4. V obou experimentech s přidavkem vápence jako aditiva byla naměřená průměrná koncentrace vyšší. V experimentu 2 byla naměřená průměrná koncentrace CO₂ vyšší o 7,8 % než v experimentu 1. V experimentu 4 byla naměřená průměrná koncentrace CO₂ vyšší o 9,4 %.

Ve všech experimentech byl pořizován kontinuální záznam přebytku O₂. V experimentu 2 byla naměřená průměrná koncentrace O₂ nižší o 16,9 % než v experimentu 1. V experimentu 4 byla naměřená průměrná koncentrace O₂ nižší o 7,0 %. V obou případech tedy došlo ke snížení koncentrace O₂ ve spalínách pro případy spalování kalu a vápence.

Výsledky jasně potvrzují, že přidavek vápence, případně vápenatých sloučenin při spalování čistírenského kalu má příznivý vliv na omezování tvorby některých nežádoucích složek ve spalínách. Jsou to především SO₂, HCl, HF, CO, některé složky PCB a PAU. Naopak přidavek vápence podporuje tvorbu CO₂ a NO. Vliv na složky těžkých kovů a TZL je minimální. Vliv na PCDD/F nebylo možno stanovit s ohledem na přesnost měření, případně koncentraci složek ve spalínách pod mezí stanovitelnosti.

Seznam použité literatury

- [1] Český statistický úřad [online]. 2011 [cit. 2011-04-08]. Vodovody kanalizace a vodní toky. Dostupné z WWW: <www.czso.cz>.
- [2] ŠTASTA, P. Využití čistírenských kalů jako alternativního paliva. Brno, 2009. 147 s. Disertační práce na fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [3] Dobšáková M., Diplomová práce, Mendlova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 2004
- [4] Houdková, L. Efektivní využití čistírenských kalů. Brno, 2009. 104 s. Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.
- [5] Boráň, J. Zpracování kalů z čistíren odpadních vod s energetickým využitím. Brno, 2008. 124 s. Disertační práce na fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [6] Wherter J., Ogada T., Sewage Sludge Combustion, Progress in Energy and Combustion Science, 1999, vol. 25, pp. 55-116
- [7] Integrovaná prevence a omezování znečištění. Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování odpadů. 2005, 753 s.
- [8] Oral, J.; Šikula, J.; Puchýř, R.; Hajný, Z.; Stehlík, P.; Bébar, L. Processing of Wastes from Pulp and Paper Plant. Journal of Cleaner Production, 2005, roč. 13, č. 5, s. 509-515. ISSN: 0959-6526
- [9] Jecha, D. Absorpční čištění spalin vznikajících spalováním odpadů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 118 s., 10 s. příloh, Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [10] Česká republika. Nařízení vlády 354/2002 Sb., kterým se stanoví emisní limity a další podmínky spalování odpadů. 2002
- [11] Hartman M., Svoboda K., Pohořený M., Combustion of Dried Sewage Sludge in Fluidized-Bed Reactor, Ind. Eng. Res., 2005, pp. 3432-3441
- [12] Ibler Z., Technický průvodce energetika 1, BEN-Technická literatura, 2002, ISBN: 978-80-7300-0
- [13] Joos F., Technishe Verbrennung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2006, ISBN: 10 3-540-34333-4

-
- [14] Subramani J., Balaiyya M., Minimum fluidization velocity at elevated temperatures for Geldart's group-B powders, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, pp. 166-173
- [15] Medek J., *Hydraulické pochody*, Akademické nakladatelství CERM, 2004, 399 s. ISBN: 80-214-2640-3
- [16] 17. Nemecké nařízení pro spalování a spolužalování odpadu: Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen, (17. BImSchV) ke dni 31. 1. 2009.
- [17] Česká republika. Nařízení vlády 350/2002 Sb., kterým se stanoví imisní limity a podmínky a způsob skladování, posuzování, hodnocení a řízení kvality ovzduší. 2002
- [18] Česká republika. Vyhláška ministerstva životního prostředí 356/2002 Sb., kterou se stanoví seznam znečišťujících látek, obecné emisní limity, způsob předávání zpráv a informací, zjišťování množství vypouštěných znečišťujících látek, tmavosti kouře, přípustné míry obtěžování zápachem a intenzity pachů, podmínky autorizace osob, požadavky na vedení provozní evidence zdrojů znečišťování ovzduší a podmínky jejich uplatňování. 2002
- [19] Directive 2000/76/EC of the European parliament, on the incineration of waste. 2000

Seznam příloh

Příloha č. 1: P1-Fluidizace částic

Příloha č. 2: P2-Stechiometrické spalování kalu